



TUGAS AKHIR - TM091486

**STUDI NUMERIK PENGARUH POSISI SUDUT  
*OBSTACLE* BERBENTUK *RECTANGULAR*  
TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN DAN  
PERPINDAHAN PANAS PADA *TUBE BANKS*  
TERSUSUN SECARA *STAGGERED***

Rizki Anggiansyah  
21.11.106.035

Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng

JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2014



TUGAS AKHIR - TM091486

**STUDI NUMERIK PENGARUH POSISI SUDUT  
*OBSTACLE* BERBENTUK *RECTANGULAR*  
TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN DAN  
PERPINDAHAN PANAS PADA *TUBE BANKS*  
TERSUSUN SECARA *STAGGERED* .**

Rizki Anggiansyah  
21.11.106.035

Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng

JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2014



FINAL PROJECT - TM091486

# **NUMERICAL STUDY OF EFFECT OF POSITION ANGLE RECTANGULAR OBSTACLE OF THE CHARACTERISTICS FLOW AND HEAT TRANSFER BASED ON STAGGERED TUBE BANKS**

RIZKI ANGGIANSYAH  
NRP. 21 11 106 035

Advisor  
Prof. Dr. Eng. Ir. PRABOWO, M.Eng

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2014



FINAL PROJECT - TM091486

# **NUMERICAL STUDY OF EFFECT OF POSITION ANGLE RECTANGULAR OBSTACLE OF THE CHARACTERISTICS FLOW AND HEAT TRANSFER BASED ON STAGGERED TUBE BANKS**

**RIZKI ANGGIANSYAH**  
**NRP. 21 11 106 035**

**Advisor**  
**Prof. Dr. Eng. Ir. PRABOWO, M.Eng**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT**  
**Faculty of Industrial Technology**  
**Sepuluh Nopember Institute of Technology**  
**Surabaya 2014**



**STUDI NUMERIK PENGARUH POSISI SUDUT  
OBSTACLE BERBENTUK RECTANGULAR TERHADAP  
KARAKTERISTIK ALIRAN DAN PERPINDAHAN PANAS  
PADA TUBE BANKS TERSUSUN SECARA STAGGERED**

**Nama** : Rizki Anggiansyah  
**NRP** : 21.11.106.035  
**Jurusan** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng

**ABSTRAK**

*Compact heat exchanger merupakan jenis alat penukar kalor yang banyak digunakan di industri gas, refrigerasi dan pengkondisian udara. Dalam hal performa, compact heat exchanger bergantung pada pola permukaan fin, yakni continuous plate fins, wavy fins dan circular fins. Permukaan wavy fin yang bergelombang membuat karakteristik aliran berubah sehingga terjadi peningkatan perpindahan panas. Upaya lain untuk meningkatkan proses perpindahan panas pada continuous plate fins adalah penambahan obstacle pada permukaannya. Performa compact heat exchanger dengan obstacle dapat diketahui dengan menganalisa pola aliran dan proses perpindahan panas yang terjadi.*

*Penelitian ini dilakukan dengan metode simulasi numerik berbantuan software Fluent 6.3.26. Simulasi ini dikondisikan dengan menggunakan model turbulensi k- $\epsilon$  RNG dan metode second-order upwind scheme. Pada penelitian ini divariasikan posisi sudut rectangular obstacle 120°, 135° dan 150° yang diukur dari stagnation point pada staggered tube banks. Fluida kerja yang digunakan adalah udara sebagai gas ideal yang mengalir melintas celah antara tube dengan temperatur inlet 310 K dan temperatur tubes konstan sebesar 347 K.*

*Dari hasil simulasi ini didapatkan visualisasi kontur kecepatan, temperatur dan visualisasi pola aliran yang terbentuk serta pembuktian hipotesa bahwa dengan adanya penambahan*



*obstacle akan meningkatkan perpindahan panas. Berdasarkan kontur temperatur menunjukkan bahwa model modified dapat lebih cepat menurun temperatur tube lebih baik daripada model baseline, dari kontur kecepatan menunjukkan bahwa kecepatan aliran meningkat secara signifikan pada tube baris kedua dan seterusnya. Selain itu, model modified juga meningkatkan nilai Nusselt number sebesar 8,9–40,6% terhadap model baseline (tanpa penambahan obstacle).*

**Kata Kunci : Fluent, Convergency Promoters, Reynolds number, Staggered Tube Banks.**





## **NUMERICAL STUDY OF EFFECT SPAN ANGLE RECTANGULAR OBSTACLE OF THE HEAT TRANSFER AND CHARACTERISTICS FLOW BASED ON STAGGERED TUBE BANKS**

**Name of Student** : Rizki Anggiansyah  
**NRP** : 21.11.106.035  
**Departement** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Advisor Lecture** : Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng

### **ABSTRACT**

*Compact heat exchanger is a type of heat exchanger is widely used in the gas industry, refrigeration and air conditioning. In terms of performance, the compact heat exchanger is depending on the fin surface composer structure, such as continuous plate fins, wavy fins and circular fins. Wavy fin surface makes the flow characteristics change so that heat transfer will increase. Other efforts to improve the heat transfer process in continuous plate fins are additional obstacle on its surface. Performance of compact heat exchangers with obstacle can be determined by analyzing the pattern of flow and heat transfer processes that occur.*

*This research was using numerical simulation method based on 6.3.26 Fluent software. The simulation was conditioned by using turbulent models  $k-\varepsilon$  RNG and second-order upwind scheme methods. In this study varied the position angle of the rectangular obstacle  $120^\circ$ ,  $135^\circ$  and  $150^\circ$  are measured from the stagnation point on a staggered tube banks. Working fluid used is air as an ideal gas flowing across the gap between the tube with inlet temperature is 310 K and tube temperature constant 347 K.*

*The final result of simulation brings in the visualization of velocity contours, temperature and the visualization of flow*



*patterns and a proving of a hypothesis that by addition of the obstacle will increase heat transfer. Based on the temperature contours, modified model can decrease air temperature better than baseline model, from velocity contour shows that the flow velocity increased significantly in the second row tube and so on. In addition, the model modified Nusselt number also increases the value of 8.9 to 40.6% of the baseline model (without additional obstacle).*

**Keyword : Fluent, Convergency Promoters, Reynolds Number, Staggered Tube Banks.**



**STUDI NUMERIK PENGARUH POSISI SUDUT  
OBSTACLE BERBENTUK RECTANGULAR TERHADAP  
KARAKTERISTIK ALIRAN DAN PERPINDAHAN PANAS  
PADA TUBE BANKS TERSUSUN SECARA STAGGERED**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar  
Sarjana Teknik pada Bidang Studi Konversi Energi Program  
Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

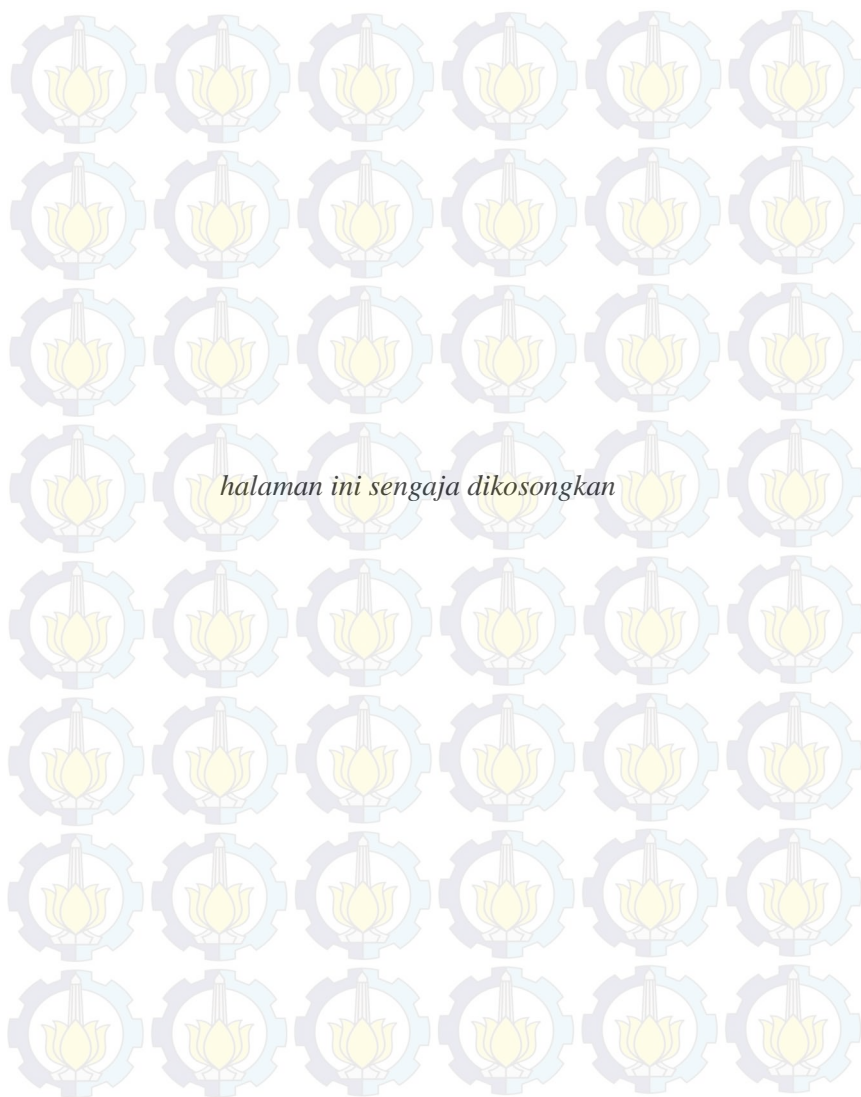
Oleh :

**RIZKI ANGGIANSYAH**

NRP. 21.11.106.035

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :	
1. <u>Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng.</u> (NIP.196505051990031005)	 ..... (Pembimbing)
2. <u>Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT</u> (NIP.197104051997021001)	 ..... (Penguji I)
3. <u>Dr. Ir. Atok Setiawan, MSc.</u> (NIP.196604021969031002)	 ..... (Penguji II)
4. <u>Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh W, MSc.</u> (NIP.195312191981031001)	 ..... (Penguji III)

**SURABAYA  
JULI 2014**





---

## **KATA PENGANTAR**

Segala puji dan syukur penulis curahkan sepenuhnya kepada Allah SWT, karena atas berkah dan izin-Nya tugas akhir ini dapat terselesaikan. Penulis sangat menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tak lepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Melalui kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dan mendukung baik secara moril maupun materil dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, antara lain:

1. Bapak Prof. Dr. Eng Ir. Prabowo, M.Eng selaku dosen pembimbing tugas akhir dan dosen wali penulis yang selalu mengarahkan dan memberikan saran, motivasi, dan ilmu-ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis.
2. Orang tua tercinta beserta keluarga yang selama ini mendukung penulis dalam proses belajar baik dukungan moril, materil dan spiritual.
3. Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT, Dr. Ir. Atok Setiawan, MSc, dan Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh W, MSc. selaku dosen penguji tugas akhir penulis, terima kasih atas saran-saran yang telah diberikan.
4. Kakak tercinta Nitra Pareatama dan Adek saya Siska Pebiana yang selalu memberikan semangat dan doa-doa nya.
5. Bella Nopita teman spesial yang selalu memberi support dan doa setiap harinya.
6. Rekan satu tim tugas akhir penulis yaitu Hastama Arinta Fanny yang selalu memberikan dukungan dan kerja sama dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
7. Teman satu kontrakan Reza, Syaiful Rizal, Setia Rahmadi, yang senantiasa saling membantu selama proses penulisan.
8. Teman-teman LJ 2011/2012 genap, terima kasih atas bantuan dan dukungannya selama ini. Semoga kita semua tidak lupa satu sama lain setelah keluar dari jurusan kita tercinta.





9. Kepada rekan-rekan alumni D3mits, khususnya angkatan 2008 yang telah memberikan dukungan dan bantuan dalam penulisan karya tulis ini.
10. Seluruh Dosen dan karyawan jurusan Teknik Mesin ITS,
11. Seluruh civitas akademik Teknik Mesin ITS.
12. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan oleh penulis.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini, oleh karena itu saran dan masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, July 2014

**Penulis**



## **DAFTAR ISI**

HALAMAN JUDUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
ABSTRAK .....	iii
KATA PENGANTAR .....	vii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL .....	xvii
DAFTAR SIMBOL .....	xviii
BAB I .....	1
PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	5
1.3 Batasan Masalah .....	6
1.4 Tujuan Penelitian .....	7
1.5 Manfaat Penelitian .....	8
BAB II .....	9
TINJAUAN PUSTAKA .....	9
2.1 Alat Penukar Panas .....	9
2.2 Tinjauan Termodinamika .....	12
2.3 Tinjauan perpindahan panas .....	14
2.3.1 Aliran Fluida Melintasi Silinder Tunggal .....	14
2.3.2 Aliran Fluida Melintasi Tube Banks .....	16
2.3.3 Perpindahan Panas Konveksi .....	19
2.3.3.1 Konveksi Aliran melintasi Silinder Sirkular Tunggal .....	21
2.4 Persamaan Dasar Aliran Fluida .....	22
2.5 Computational Fluid Dynamics (CFD) .....	23
2.5.1 Struktur Program CFD .....	23
2.5.2 Tahapan Kerja dalam CFD .....	24
2.6 Grid Independency .....	24
2.7 Penelitian Terdahulu .....	26

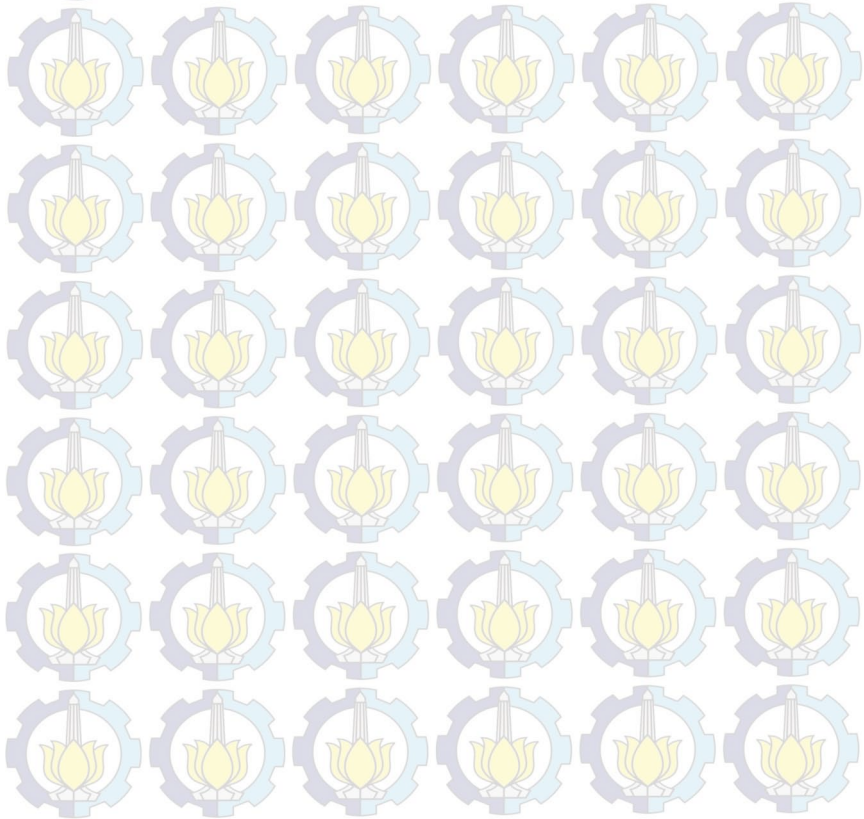


BAB III.....	37
METODE PENELITIAN .....	37
3.1. Pre-Processing .....	37
3.1.1. Pembuatan model .....	37
3.1.2. Pembuatan Meshing .....	40
3.1.3. Variabel Penelitian .....	41
3.2. Processing.....	41
3.2.1 Pemilihan Solver .....	41
3.2.2 Pemilihan Turbulance Modelling.....	42
3.2.3 Pemilihan Operating Condition.....	42
3.2.4 Penentuan Boundary Condition .....	43
3.2.5 Solving .....	45
3.2.5.1 Solve Metode .....	45
3.2.5.2 Iterasi.....	45
3.3 Grid Independency .....	46
3.4 Post processing .....	48
3.5 Flowchart Penelitian.....	49
BAB IV .....	51
HASIL dan PEMBAHASAN .....	51
4.1 Analisa Pola Aliran Terhadap Variasi Sudut Obstacle.....	51
4.1.2 Pengaruh Adanya Penambahan Obstacle (model modified) Pada Model Baseline .....	54
4.2 Pengaruh Variasi Sudut Obstacle .....	55
4.2.1 Kontur Kecepatan.....	55
4.2.1.1 Model Baseline (tanpa adanya penambahan obstacle) .....	56
4.2.1.2 Pengaruh adanya penambahan obstacle (model modified) pada model baseline .....	57
4.2.2 Kontur Temperatur.....	57
4.2.2.1 Model Baseline (tanpa adanya penambahan obstacle) .....	58
4.2.2.2 Pengaruh adanya penambahan obstacle (model modified) pada model baseline.....	59
4.3 Analisa Karakteristik Perpindahan Panas Pengaruh Penambahan Obstacle.....	61





4.3.1 Kecepatan Lokal Tube.....	61
4.3.2 Koefisien Konveksi Lokal Tube.....	64
4.4 Nusselt Number Lokal Tube .....	66
4.4.1 Nilai Nusselt number rata-rata.....	75
5.1 Kesimpulan.....	79
5.2. Saran.....	80
DAFTAR PUSTAKA.....	81
LAMPIRAN.....	83
RIWAYAT PENULIS.....	93





*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. (a). Evaporator, (b). Kondensor AC Split, dan (c). Radiator Mobil .....	2
Gambar 1.2. Macam-macam <i>Compact Heat Exchanger</i> .....	2
Gambar 1.3. Macam-macam tipe Permukaan <i>Fin</i> .....	3
Gambar 2.1. Jenis Compact Heat Exchanger .....	9
Gambar 2.2. Bentuk geometri <i>tube-fin</i> dari tipe <i>compact heat exchanger</i> .....	10
Gambar 2.3. <i>Heat Transfer</i> dan <i>Friction Factor</i> untuk <i>Circular Tube-Circular Fin Heat Exchanger</i> , Surface CF-7.0-5/8J dari Kays and London .....	11
Gambar 2.4. <i>Heat Transfer</i> dan <i>Friction Factor</i> untuk <i>Circular Tube-Circular Fin Heat Exchanger</i> , Surface CF-8.0-3/8T dari Kays and London .....	12
Gambar 2.5. (a) skema siklus refrigerasi kompresi-uap ideal (b) P-h diagram .....	12
Gambar 2.6. <i>Boundary layer</i> dan titik separasi pada silinder sirkuler .....	15
Gambar 2.7. Profil kecepatan pada dinding silinder .....	15
Gambar 2.8. Pengaruh turbulensi terhadap titik separasi .....	16
Gambar 2.9. Jenis susunan <i>tube</i> (a) Susunan <i>Aligned</i> (b) Susunan <i>Staggered</i> .....	16
Gambar 2.10. Aliran Fluida Melintasi Susunan <i>Tube Banks</i> , (a) susunan <i>Aligned</i> dan (b) Susunan <i>Staggered</i> .....	17
Gambar 2.11. Konveksi Aliran Melintasi Plat Datar .....	20
Gambar 2.12. Perpindahan Panas Konveksi .....	21
Gambar 2.13. Distribusi Angka <i>Nusselt</i> pada Silinder .....	22
Gambar 2.14. Volume Atur Pada Koordinat Rectangular .....	22
Gambar 2.15. Variasi dari Nilai <i>Nusselt</i> number Terhadap Perbedaan Grid Number .....	25
Gambar 2.16. (a) <i>Domain Computational</i> (kiri), Geometri <i>Tube</i> dan <i>RWP</i> , (b) variasi Jumlah <i>RWP</i> yang Terpasang Pada <i>Section Area</i> .....	27





Gambar 2.17. Distribusi Kecepatan Lokal (a) susunan <i>tube</i> secara <i>baselines</i> dan (b) 3-RWP <i>inline</i> pada $Re=850$ .....	27
Gambar 2.18. Distribusi Temperatur Lokal (a) susunan <i>tube</i> secara <i>baselines</i> dan (b) 3-RWP <i>inline</i> pada $Re=850$ .....	28
Gambar 2.19. (a) Heat Transfer Coefficient $h_{air}$ , (b) Pressure Drop $\Delta P$ dan (c) Performa $j/f$ Keseluruhan Berbanding dengan Nilai $Re$ .....	28
Gambar 2.20. Geometri <i>Novel Heat Exchanger with Delta Winglet Vortex Generators</i> .....	29
Gambar 2.21. Struktur <i>Longitudinal Vortex Generators</i> .....	29
Gambar 2.22. Perbandingan Antara Koefisien Konveksi Pada $Re$ Sebesar 600, 1400 dan 2200 (a) Terhadap <i>Attack Angel</i> dan (b) Terhadap <i>Aspect Ratio</i> .....	30
Gambar 2.23 (a) Geometri <i>Plate-Fins</i> dan <i>Tube Heat Exchangers</i> (b) <i>computational domain</i> (c) posisi sudut <i>delta winglet</i> .....	31
Gambar 2.24 Karakteristik Aliran dan Static Pressure (a) <i>Rectangular Winglet 45°</i> (b) <i>Delta Winglet 45°</i> .....	31
Gambar 2.25 Geometri <i>Plate-Fins</i> dan <i>Tube Heat Exchangers</i> dan <i>Computational Domain</i> (a) <i>In-lined arrangement</i> dan (b) <i>Staggered arrangement</i> .....	33
Gambar 2.26 Perbandingan dari Distribusi Kecepatan Dengan Adanya <i>Vortex Generators</i> dan Tanpa Adanya <i>Vortex Generators</i> pada $ReDh = 1200$ dan $Z = 1,96 \text{ mm}$ (a) <i>in-lined arrangement</i> (b) <i>staggered arrangement</i> .....	33
Gambar 2.27 Perbandingan dari Distribusi Temperatur Dengan Adanya <i>Vortex Generators</i> dan Tanpa Adanya <i>Vortex Generators</i> pada $ReDh = 1200$ dan $Z = 1,96 \text{ mm}$ (a) <i>in-lined arrangement</i> (b) <i>staggered arrangement</i> .....	33
Gambar 2.28 Grafik Perbandingan Nilai <i>Nusselt</i> Antara <i>Standard Baseline</i> (tanpa penambahan <i>CP's</i> ) dan <i>Model Modified</i> (dengan penambahan <i>CP's</i> ) .....	35
Gambar 2.29 Grafik Perbandingan <i>Nusselt number</i> pada tiap <i>Row</i> Terhadap Variasi Kecepatan Inlet .....	35



Gambar 3.1. Geometri <i>Straight Fin Circular Tube</i> Tanpa Adanya Penambahan <i>Obstacle</i> .....	38
Gambar 3.2. Geometri <i>Straight Fin Circular Tube</i> Dengan Adanya Penambahan <i>Obstacle</i> variasi sudut <i>obstacle</i> yang berbeda (a) sudut 120° dari titik stagnasi, (b) sudut 135° dari titik stagnasi, dan (c) sudut 150° dari titik stagnasi.....	38
Gambar 3.3 <i>Straight Fin Circular Tube</i> , (a) Tanpa Penambahan <i>Obstacle</i> (b) dengan Penambahan <i>Obstacle</i> .....	39
Gambar 3.4 (a) <i>Meshing</i> pada <i>Continuous Plate fin Circular Tube</i> Tanpa penambahan <i>Obstacle</i> .....	40
Gambar 3.4 (b) <i>Meshing</i> pada <i>Continuous Plate fin Circular Tube</i> Dengan penambahan <i>Obstacle</i> .....	40
Gambar 3.5. <i>Boundary Condition</i> pada domain pemodelan <i>Compact Heat Exchanger Tipe Straight Fin Circular Tube</i> dengan Penambahan <i>Obstacle</i> yang Berbentuk <i>Ractangular</i> .....	45
Gambar 3.6 Kriteria Konvergensi.....	46
Gambar 3.7 Flowchart Penelitian .....	49
Gambar 4.1 Hasil Pemodelan: visualisasi <i>pathlines</i> pada model <i>baseline</i> (tanpa adanya penambahan <i>obstacle</i> ).....	51
Gambar 4.2 Visualisasi <i>Pathlines by Velocity Magnitude</i> .....	52
Gambar 4.3 Visualisasi Pola Aliran <i>Baseline</i> (tanpa penambahan <i>Obstacle</i> ) (a) Posisi Kecepatan Maksimum dan (b) Perbesaran untuk daerah separasi.....	53
Gambar 4.4 Visualisasi Pola Aliran Model <i>Modified</i> (dengan penambahan <i>Obstacle</i> ) (a) Pola Aliran <i>by Pathlines Velocity</i> dan (b) Perbesaran untuk sudut <i>obstacle</i> 150° pada Daerah <i>Downstream</i> ( $\theta=90^\circ$ ).....	55
Gambar 4.5 Visualisasi Kontur Kecepatan.....	56
Gambar 4.6 Visualisasi Kontur Temperatur.....	58
Gambar 4.7 Distribusi Temperature Outlet (a) Model <i>Baseline</i> (tanpa adanya penambahan <i>obstacle</i> ) dan (b) Model <i>Modified</i> (adanya penambahan <i>obstacle</i> ) .....	60
Gambar 4.8 Temperatur Rata-rata Outlet dan Nilai Nusselt number Rata-rata.....	60

---



Gambar 4.9 Distribusi Kecepatan Lokal <i>Tube Model Baseline</i> (tanpa penambahan <i>obstacle</i> ) .....	62
Gambar 4.10 Distribusi Kecepatan Lokal Tube Perbandingan Antara Model Baseline (tanpa penambahan <i>obstacle</i> ) dan Model Modified (dengan penambahan <i>obstacle</i> ) .....	64
Gambar 4.11 Distribusi Koefisien Konveksi Lokal Tube Model Baseline (tanpa <i>obstacle</i> ) .....	65
Gambar 4.12 Distribusi Nusselt number Lokal Tube Model Baseline (tanpa penambahan <i>Obstacle</i> ).....	67
Gambar 4.13 Distribusi Nusselt number Lokal Tube Model Modified (dengan posisi sudut <i>obstacle</i> sebesar $150^\circ$ ) .....	68
Gambar 4.14 Distribusi Nusselt number Lokal Tube Model Modified (dengan posisi sudut <i>obstacle</i> sebesar $135^\circ$ ) .....	69
Gambar 4.15 Distribusi Nusselt number Lokal Tube Model Modified (dengan posisi sudut <i>obstacle</i> sebesar $120^\circ$ ) .....	70
Gambar 4.16 Perbandingan Distribusi Nusselt number lokal tube model Modified dengan baseline terhadap tube row 1 .....	72
Gambar 4.17 Perbandingan Distribusi Nusselt number lokal tube model Modified dengan baseline terhadap tube row 2.....	73
Gambar 4.18 Perbandingan Distribusi Nusselt number lokal tube model Modified dengan baseline terhadap tube row 3 .....	74
Gambar 4.19 Nusselt number rata-rata lokal tube .....	75
Gambar 4.20 Nusselt number Rata-rata dan Pressure Drop .....	77





**DAFTAR SIMBOL**

$A$	=	luas area ( $m^2$ )
$c_p$	=	specific heat ( $J/kg.K$ )
$g$	=	percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )
$h$	=	koefisien konveksi ( $W/m^2.K$ )
$hm$	=	mass transfer coefficient ( $m/s$ )
$k$	=	<i>thermal conductivity</i> ( $W/m.K$ )
$M$	=	massa ( $kg$ )
$Pr$	=	bilangan Prandtl
$q''$	=	<i>heat flux</i> ( $W/m^2$ )
$Re$	=	bilangan Reynolds
$T$	=	temperatur ( $^{\circ}C$ )
$t$	=	waktu ( $s$ )
$V$	=	volume ( $m^3$ )
$\frac{\partial u}{\partial y}$	=	gradien kecepatan, $1/s$

*Greek Symbols*

$\infty$	=	udara
$\phi$	=	kelembaban relatif
$\rho$	=	massa jenis ( $kg/m^3$ )
$\mu$	=	viskositas ( $Ns/m^2$ )
$\nu$	=	viskositas kinematis ( $m^2/s$ )
$\alpha$	=	diffusivitas panas ( $m^2/s$ ), <i>absorbtivity</i>

*Subscripts*

$D$	=	diameter
$i$	=	kondisi awal
$L$	=	panjang
$\infty$	=	ambient

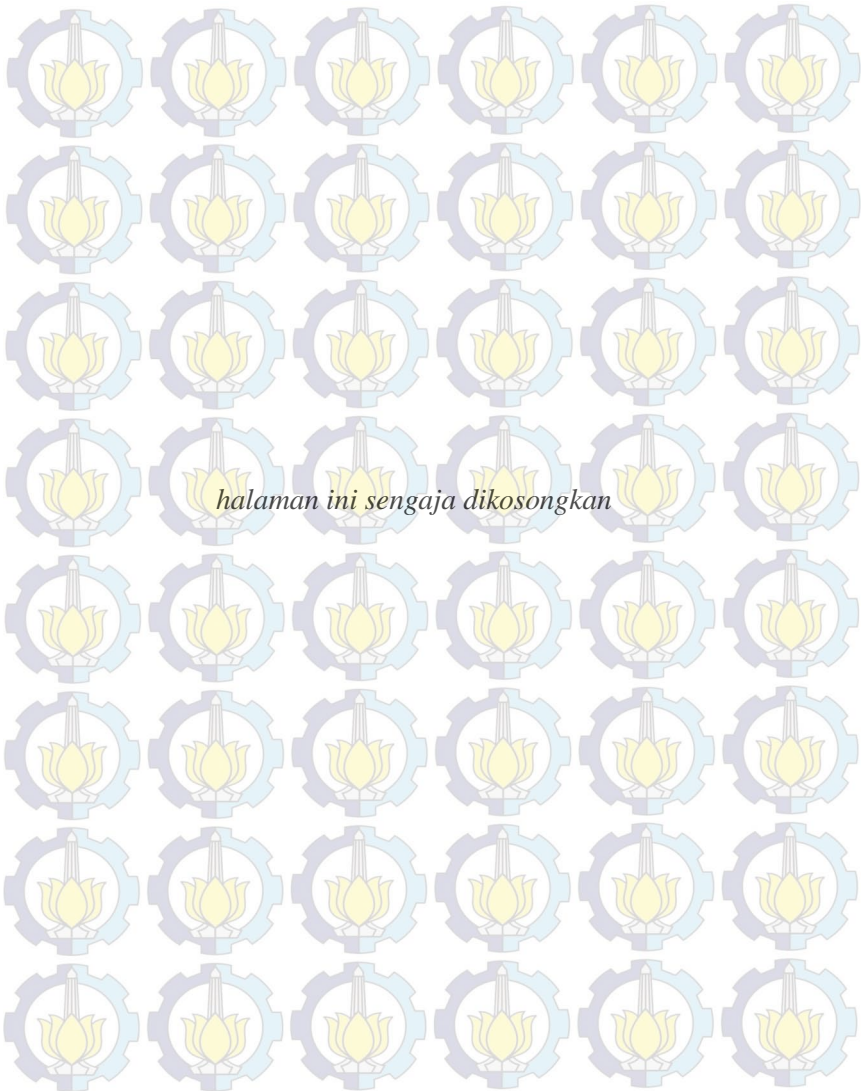


*halaman ini sengaja dikosongkan*



**DAFTAR TABEL**

Tabel 2.1 konfigurasi susunan tube untuk aliran yang melintasi tube banks yang terdiri dari 10 baris atau lebih.....	18
Tabel 2.2 faktor koreksi $C_2$ perumusan untuk $NL < 10$ .....	19
Tabel 2.3 Kombinasi optimum dari letak sudut ( $\theta$ ) dan lokasi transverse dari ReDh (a) In-lined arrangement (b) Staggered arrangement.....	34
Tabel 3.1 Geometri Compact Heat Exchanger Tipe Continuous Plate fin Circular Tube.....	39
Tabel 3.2 Boundary Condition Continuous Plate Fin Circular Tube.....	43
Tabel 3.3 Properties Fluida (Udara yang Dimodelkan sebagai gas ideal).....	44
Tabel 3.4 Properties Material Tube.....	44
Tabel 3.5 Skema Grid Independensi pada baseline.....	47
Tabel 3.6 Nilai Nu avg model <i>baseline</i> .....	47
Tabel 4.1 Kisaran Kenaikkan Nusselt number Lokal Tube Akibat Adanya Penambahan Obstacle.....	75
Tabel 4.2 Kisaran Kenaikan Nilai Nusselt number Rata-rata lokal Tube Model Modified (Adanya Penambahan Obstacle).....	76







## **BAB I**

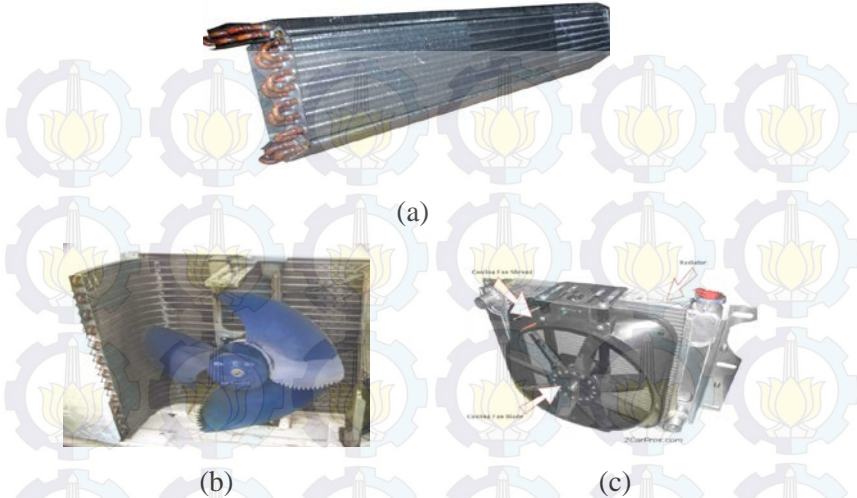
### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

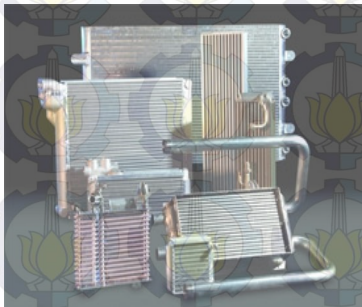
Industri merupakan tempat penerapan dan pengaplikasian teknologi. Salah satu teknologi memiliki peranan penting di dunia industri gas, refrigerasi dan pengkondisian udara adalah alat penukar kalor (*heat exchanger*). Alat penukar kalor merupakan suatu alat yang menghasilkan perpindahan panas dari suatu fluida ke fluida lainnya. Meningkatkan kesadaran untuk pemanfaatan sumber daya energi yang efektif, meminimalkan biaya operasional dan pemeliharaan operasi murah telah menyebabkan perkembangan dari alat penukar panas yang efisien seperti alat penukar kalor kompak. Alat penukar kalor banyak digunakan di berbagai industri tenaga atau industri lainnya dikarenakan mempunyai beberapa keuntungan, antara lain :

1. Konstruksi sederhana dan kokoh.
2. Biaya yang digunakan relatif murah.
3. Kemampuannya untuk bekerja pada tekanan dan temperatur yang tinggi dan tidak membutuhkan tempat yang luas.

Alat penukar kalor kompak (*compact heat exchanger*) merupakan salah satu tipe dari alat penukar kalor yang memiliki kepadatan luas permukaan lebih dari  $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Kekompakan tersebut dicapai dengan menyediakan perpanjangan permukaan yaitu *fin* pada bagian aliran yang bekerja sebagai area perpindahan panas sekunder. *Compact heat exchanger* atau alat penukar panas kompak banyak digunakan di dunia industri maupun untuk keperluan sehari-hari baik untuk fluida gas dengan gas maupun gas dengan cairan, beberapa contoh penggunaannya adalah evaporator dan kondesor pada system refrigerasi dan pengkondisian udara sebagaimana ditunjukkan pada gambar 1.1 (a) dan gambar 1.1 (b). Radiator pada mesin-mesin otomotif.



Gambar 1.1 (a) *Evaporator* (<http://mhasanb.blogspot.com>) (b) *Condenser AC Split* (<http://service-ac-pondok-gede.blogspot.com>) dan (c) *Radiator Mobil* (<http://tetrag5.blogspot.com>)

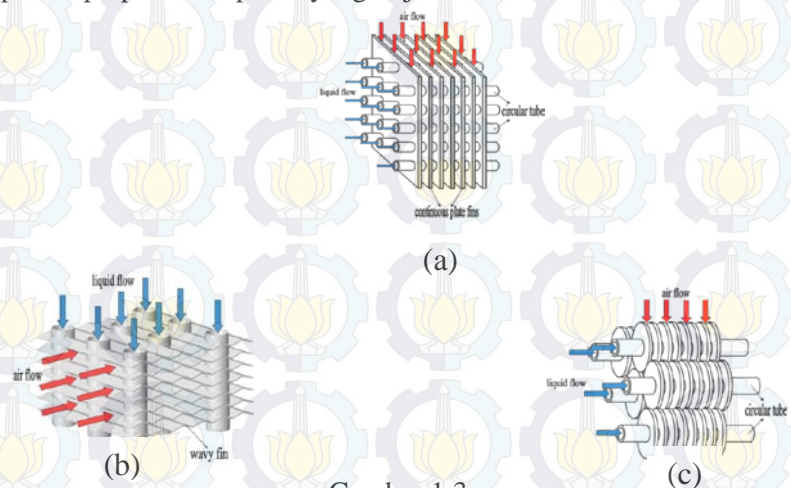


Gambar 1.2 Macam-macam *Compact Heat Exchanger* (<http://www.heatexchangerindonesia.com>)





Sirip (*fin*) merupakan ciri utama dari *compact heat exchanger*. Bentuk geometri dari *fin* akan berpengaruh terhadap optimasi kerja yaitu dengan adanya *fin* maka luasan permukaan perpindahan panas secara konveksi akan menjadi lebih besar. Macam-macam bentuk geometri *fin* yang biasa digunakan yaitu model *continuous plate fins with circular tube*, *wavy fins with circular tube* dan *circular fins with circular tube*, sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 1.3 (a), (b) dan (c). Permukaan *wavy fin* yang bergelombang membuat karakteristik aliran berubah sehingga terjadi peningkatan perpindahan panas. Upaya lain untuk meningkatkan proses perpindahan panas pada *continuous plate fins* adalah penambahan *obstacle* pada permukaannya. Performa *compact heat exchanger* dengan *obstacle* dapat diketahui dengan menganalisa pola aliran dan proses perpindahan panas yang terjadi.



Gambar 1.3

Macam-macam Tipe Permukaan *Fin* (a) *circular tube*, *continuous plate fins*, (b) *circular tube*, *wavy fin* dan (c) *circular tube*, *circular fins* (Gupta, 2010)



Seiring dengan berkembangnya zaman, *fin and tube heat exchanger* dituntut untuk dapat menyajikan performa yang sesuai dengan fungsi kerjanya melalui perubahan bentuk tipe permukaan *fin* ataupun modifikasi penambahan pada permukaan *fin*, seperti penambahan *Vortex Generators* (VGs) atau penambahan *obstacle*.

Penelitian mengenai penambahan atau modifikasi pada bagian permukaan *fin* terhadap karakteristik aliran dan perpindahan panas pada *tube banks* yang tersusun secara *staggered* ataupun *inlined* telah beberapa kali dilakukan. **Chu, dkk** (2009) dalam “*Three-Dimensional Numerical Study of Flow and Heat Transfer Enhancement Using Vortex Generators in Fin-and-Tube Heat Exchangers*”. Bilangan Reynolds divariasikan pada rentang 500-880, sementara pada permukaan *fin* dipasang RWP dengan jumlah 1 RWP, 3 RWP dan 7 RWP. Melakukan simulasi numerik untuk mengetahui pengaruh modifikasi permukaan dan karakteristik aliran. Penelitian tersebut menggunakan *software CFD* untuk mengetahui distribusi kecepatan lokal dan distribusi temperatur lokal pada *fin and tube Heat Exchanger* tanpa dan menggunakan RWP.

Penelitian yang dilakukan oleh **Lei, dkk** (2010) tentang “*Hydrodynamics and Heat Transfer Characteristics of a Novel Heat Exchanger with Delta-Winglet Vortex Generators*” dilakukan simulasi numerik untuk mengetahui pengaruh variasi *attack angle* dari  $10^\circ$  sampai  $15^\circ$  dan *aspect ratio* dari 1 sampai 4 dengan variasi bilangan Reynolds number (600-2200). Penelitian tersebut menggunakan *software CFD* untuk mengetahui distribusi temperatur pada permukaan *fin* dan perbandingan nilai koefisien konveksi terhadap *attack angle* dan *aspect ratio*.

Dalam penelitian yang telah dilakukan **Kannan dan Kumar** (2011) berjudul “*Heat Transfer and Fluid Flow Analysis in Plate-Fin and Tube Heat Exchangers with Different Shaped Vortex Generators*” dilakukan simulasi numerik untuk mengetahui pengaruh penambahan *vortex generator* yang berbentuk *rectangular winglet* dan *delta winglet* terhadap



karakteristik aliran fluida dan perpindahan panas pada susunan *inline Tube Heat Exchanger*. Reynolds Number dan posisi peletakan *vortex generators* divariasikan pada rentang 500-2500 dan  $30^{\circ}$ - $60^{\circ}$ . Penelitian ini menunjukkan adanya peningkatan rata-rata perpindahan panas dan penurunan pressure drop pada posisi sudut *delta winglet* sebesar  $45^{\circ}$ .

Penelitian yang dilakukan oleh **Jang, dkk**, (2013) berjudul "*Optimization of the Span Angle and Location of Vortex Generators in a Plate-Fin and Tube Heat Exchanger*". bertujuan untuk mengetahui jarak optimal dari sudut vortex generators dan lokasi tranverse yang dilakukan secara numerik dengan metode "*simplified conjugate-gradient method*" (SCGM). Bilangan Reynolds dan posisi peletakkan vortex generators divariasikan pada rentang 400-1200 dan  $30^{\circ}$ - $60^{\circ}$  dengan lokasi tranverse 2-10 mm pada susunan *tube heat exchangers* secara *in-lined arrangement* dan *staggered arrangement*.

Menurut penelitian dari **Kristianto** (2013) tentang "*Studi Numerik Pengaruh Convergency Promoters (CP's) terhadap Karakteristik Aliran dan Perpindahan Panas dengan  $L/D = 0,15$  pada Tube Banks yang Tersusun Secara Staggerred*" nilai Nusselt number rata-rata dan nilai koefisien *heat transfer* yang dihasilkan dari model *modified* dengan adanya penambahan *convergency promoters* (CPs) meningkat, yakni besar peningkatannya berkisar antara 25,8-40,6% lebih tinggi dari pada model *baseline* sehingga perpindahan panas yang terjadi akan lebih baik.

## 1.2 Perumusan Masalah

Pada penelitian ini mengkaji karakteristik aliran yang terjadi pada *compact heat exchanger* tipe *continuous plate fins circular tube* tanpa dan menggunakan *obstacle* dengan melakukan analisa secara numerik aliran dua dimensi. Berdasarkan hal tersebut pada penelitian ini, rumusan masalah yang akan dikaji yaitu :





## *Tugas Akhir Konversi Energi*

1. Bagaimana pengaruh konfigurasi susunan *tube* yang tersusun secara *staggered* terhadap karakteristik aliran dan perpindahan panas pada *continuous plate fins circular tube* dengan menggunakan *fin* yang dimodifikasi dengan menambahkan *obstacle*?
2. Bagaimana pengaruh variasi posisi sudut *obstacle* berbentuk *rectangular* pada kemiringan  $120^\circ$ ,  $135^\circ$  dan  $150^\circ$  berdasarkan titik pusat *tube* yang diukur dari *stagnation point* terhadap karakteristik aliran pada *continuous plate fins circular tube*?
3. Bagaimana pengaruh variasi posisi sudut *obstacle* berbentuk *rectangular* pada kemiringan  $120^\circ$ ,  $135^\circ$  dan  $150^\circ$  berdasarkan titik pusat *tube* yang diukur dari *stagnation point* terhadap proses perpindahan panas pada *continuous plate fins circular tube*?

Hasil yang didapatkan dari simulasi berupa karakteristik aliran yang ditunjukkan dengan data kualitatif berupa distribusi kecepatan aliran dan distribusi temperatur, sedangkan data kuantitatifnya ditunjukkan dengan nilai kecepatan lokal tube, koefisien konveksi lokal, Nusselt number lokal, dan Nusselt number rata-rata pada permodelan tanpa dan dengan adanya penambahan *rectangular obstacle*.

### **1.3 Batasan Masalah**

Dalam penelitian ini diperlukan batasan masalah agar analisa dan kajian yang dilakukan akan lebih terarah. Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Pemodelan *continuous plate fins circular tube* tanpa dan menggunakan *Obstacle* yang berbentuk *rectangular* dengan perbandingan  $\ell/D = 8$  dibuat dengan menggunakan perangkat lunak *GAMBIT 2.2.30* disimulasikan dengan perangkat lunak *FLUENT 6.3.26* dengan domain aliran dua dimensi (2D) keakuratan ganda (*double precision*).
2. Fluida kerja yang mengalir pada celah antar *fin* berupa fluida panas (udara yang dimodelkan sebagai gas ideal), propertinya



konstan dan yang mengalir pada *tube* berupa fluida dingin (air).

3. Kondisi operasi diasumsikan *steady flow*, *uniform flow* dan *incompressible flow* di sisi *inlet*.
4. Perpindahan panas terjadi secara konveksi dan konduksi dengan mengabaikan perpindahan panas secara radiasi.
5. Posisi *obstacle* berbentuk *rectangular* pada kemiringan  $120^\circ$ ,  $135^\circ$  dan  $150^\circ$  terhadap titik pusat *tube* diukur dari *stagnation point*.
6. Pada sisi *inlet* dikondisikan berupa *velocity inlet* dan *outflow* pada sisi *outlet*nya.

#### **1.4 Tujuan Penelitian**

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik aliran pada *compact heat exchanger* tipe *continuous plate fins circular tube* tersusun *staggered* tanpa dan menggunakan *Obstacle* yang berbentuk *rectangular*. Selain dilakukan untuk mengetahui karakteristik aliran, penelitian ini juga bertujuan untuk beberapa hal, antara lain:

1. Mengetahui pengaruh konfigurasi susunan *tube staggered* terhadap karakteristik aliran dan perpindahan panas pada *continuous plate fins circular tube* tanpa dan dengan adanya penambahan *rectangular obstacle*.
2. Mengetahui pengaruh variasi posisi sudut *rectangular obstacle* pada kemiringan  $120^\circ$ ,  $135^\circ$  dan  $150^\circ$  yang diukur dari *stagnation point* terhadap karakteristik aliran dan perpindahan pada *continuous plate fins circular tube*.
3. Melakukan pembuktian hipotesa dengan adanya penambahan *obstacle* akan meningkatkan laju perpindahan panas yang terjadi pada permukaan *fin*.



### **1.5 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat pada semua pihak. Manfaat dari penelitian ini antara lain:

1. Memperkaya dan memperdalam wacana dalam bidang ilmu perpindahan panas dan massa khususnya mengenai alat penukar panas.
2. Pengetahuan terkait fenomena aliran secara analisa 2D karakteristik aliran dan perpindahan panas pada alat penukar panas lewat visualisasi aliran dengan perangkat lunak *Fluent* 6.3.26.
3. Memberikan kontribusi nyata pada pengembangan teknologi perancangan alat penukar panas demi terciptanya ketahanan energi nasional.



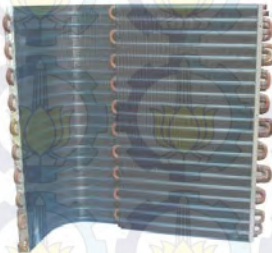


## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Alat Penukar Panas**

Alat penukar panas (*heat exchanger*) merupakan alat yang difungsikan untuk menghasilkan suatu proses perpindahan energi panas antara dua fluida yang mengalir, baik fluida cair atau pun gas dan fluida tersebut memiliki beda temperatur. Energi panas yang berpindah dari fluida yang bertemperatur lebih tinggi ke temperatur yang lebih rendah. Berbagai macam aplikasi dari alat penukar panas telah banyak digunakan industri. Alat-alat Penukar panas banyak digunakan di industri-industri dalam berbagai macam aplikasi yang berbeda-beda. Jenis-jenis alat penukar panas yang dikelompokkan berdasarkan konstruksinya yaitu *shell and tube heat exchanger*, *compact heat exchanger* dan *concentric heat exchanger*.

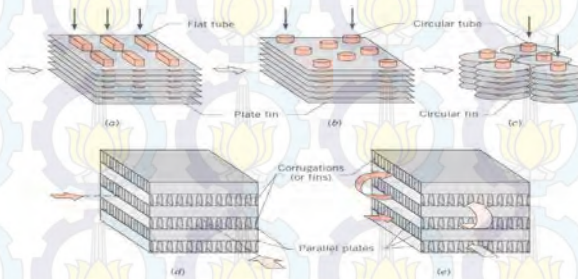


Gambar 2.1 Jenis *Compact Heat Exchanger*  
(<http://airconditionernewsz.blogspot.com>)

*Compact heat exchanger* merupakan salah satu jenis alat penukar panas yang memiliki luas permukaan perpindahan panas per unit volume yang paling besar per unit volume yaitu  $\geq 400 \text{ m}^2/\text{m}^3$  untuk fluida cair dan  $\geq 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$  untuk gas. Alat penukar panas jenis *compact heat exchanger* disusun oleh tabung-tabung (*tubes*) dan sirip-sirip (*fins*). Dengan fluida cair yang mengalir didalam *tube-tube* sedangkan gas mengalir melalui celah diantara *fin* dan permukaan luar *tube* yang memiliki beda temperatur.



Konstruksi dari *compact heat exchanger* biasanya terdiri dari susunan *finned tube* atau *plate fin*. Bentuk dari *tube* biasanya adalah *circular* atau *flat*, terutama perbedaan tersebut pada desain bentuk geometri *fin* berupa *wavy fin*, *circular fin* dan *continuous plate fin* kemudian pada susunan *tube* secara *aligned* atau *staggered arrangement*. Beberapa contoh bentuk *tube-fin* dari tipe *compact heat exchanger* ini ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Bentuk Geometri *Tube-Fin* Dari Tipe *Compact Heat Exchanger* (Incopera dan DeWitt, 2007)

Karakteristik aliran dan proses perpindahan panas telah ditentukan oleh susunan yang lebih spesifik dan secara khusus ditunjukkan pada gambar 2.3 dan 2.4. Hasil perpindahan panas adalah hubungan antara persamaan *Colburn j factor*,  $j_H = St \cdot Pr^{2/3}$  dan *reynolds number*, dimana keduanya *Stanton Number*  $St = h/G \cdot cp$  dan *Reynolds Number*,  $Re = G \cdot D_h / \mu$  adalah dasar dari kecepatan maksimum masa.

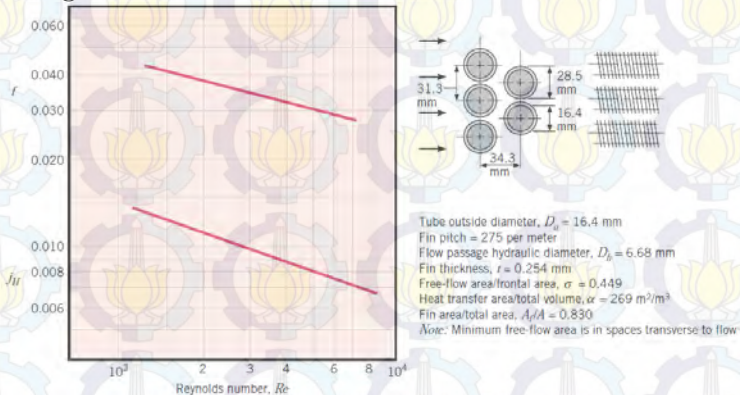
$$G \equiv \rho \cdot V_{max} = \frac{\rho \cdot V \cdot A_{fr}}{A_{ff}} = \frac{\dot{m}}{A_{ff}} = \frac{\dot{m}}{\sigma A_{fr}} \dots \dots \dots (2.1)$$

$\sigma = \frac{A_{ff}}{A_{fr}}$  adalah Perbandingan luas aliran bebas pada area bagian *fin* (aliran yang melintasi *fins*)  $A_{ff}$ , terhadap luas frontal  $A_{fr}$  dari *heat exchanger*. Nilai dari  $\sigma$ ,  $D_h$  (diameter hidrolik),  $\alpha$  (luas area perpindahan panas per total volume *heat exchanger*),  $A_f/A$  (rasio dari *fin* dan total luas area perpindahan panas) dan masing-masing



parameter dari bentuk geometri lainnya. Pada rasio  $A_f/A$  digunakan untuk mengetahui *temperature effectiveness*

$\eta_0 = 1 - \frac{A_f}{A} (1 - \eta_f)$ . Untuk perhitungan desain,  $\sigma$  ditentukan untuk mengetahui volume *heat exchanger*, setelah total luas area perpindahan panas didapatkan. Untuk perhitungan performa,  $\sigma$  digunakan untuk menentukan area permukaan dari volume *heat exchanger*.



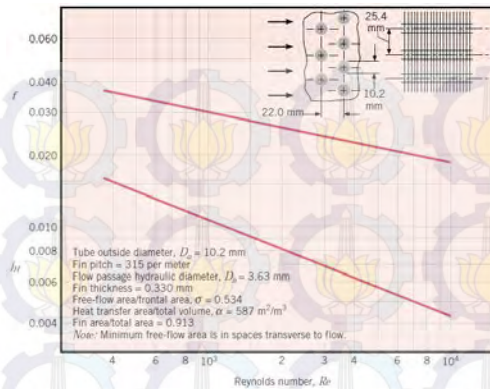
Gambar 2.3 *Heat Transfer dan Friction Factor untuk Circular Tube-Circular Fin Heat Exchanger, Surface CF-7.0-5/8J* dari Keys and London (**Incopera dan DeWitt, 2007**)

Koefisien perpindahan panas konveksi untuk aliran yang melintasi *fin* dapat dihitung dengan rumusan sebagai berikut

$$h = j_h \frac{G \cdot C_p}{P_r^{1/3}} \dots \dots \dots (2.2)$$

semua properties pada persamaan diatas dihitung pada temperatur rata-rata udara dan faktor *J Colburn* diperoleh dari grafik sebagai fungsi bilangan Reynolds seperti ditunjukkan pada gambar 2.3 dan 2.4.

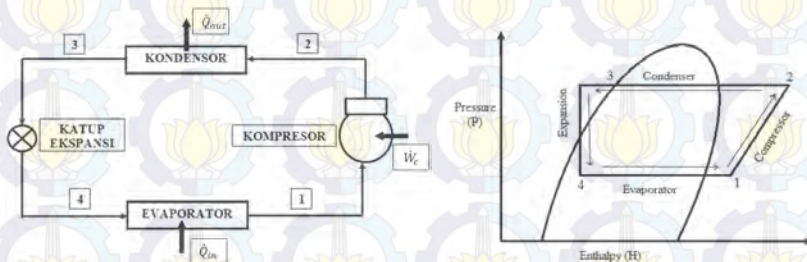




Gambar 2.4 *Heat Transfer dan Friction Factor untuk Circular Tube-Continuous Fin Heat Exchanger, Surface CF-8.0-3/8T* dari Kays and London (Incopera dan DeWitt, 2007)

## 2.2 Tinjauan Termodinamika

Sistem refrijerasi bertujuan untuk menjaga daerah dingin dengan temperatur di bawah temperatur sekitar nya. Sistem refrijerasi kompresi uap merupakan sistem refrijerasi yang digunakan saat ini. Pengoperasian pada kondisi tunak sebuah sistem kompresi uap yang ditunjukkan pada gambar 2.5 yang menunjukkan komponen-komponen utama, urutan proses kerja pada p-h diagram dan perpindahan panas utama yang terjadi pada sistem.



Gambar 2.5 (a) Skema Siklus Refrijerasi Kompresi-Uap Ideal (b) P-h Diagram





Pada saat refrijerasi melewati evaporator, perpindahan panas dari ruang yang direfrijerasi menghasilkan penguapan refrijeran. Temperatur dan tekanan refrijeran tetap selama proses yang terjadi pada kondisi 4 menuju kondisi 1. Untuk volume atur yang melingkupi sisi refrijeran didalam evaporator tersebut, kesetimbangan laju massa dan energi terinduksi untuk memberikan laju perpindahan panas per satuan massa dari aliran refrijeran.

$$\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} = h_1 - h_4 \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana  $\dot{m}$  adalah laju aliran massa refrijeran. Laju perpindahan panas  $\dot{Q}_{in}$  dapat disebut sebagai kapasitas refrijerasi. Kemudian refrijeran yang meninggalkan evaporator dikompresikan ketekanan dan temperatur relatif tinggi oleh kompresor secara adiabatik dari kondisi 1 dimana refrijeran masih berupa campuran dua fase cair-uap menuju kekondisi 2 dimana refrijeran menjadi uap jenuh. Mengasumsikan tidak ada perpindahan panas ke atau dari kompresor, laju keseimbangan massa dan energi untuk volume atur yang melingkup kompresor memberikan

$$\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = h_2 - h_1 \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana  $\dot{W}_c / \dot{m}$  adalah laju dari masukan daya persatuan massa dari aliran refrijeran. Selanjutnya, refrijeran melalui kondenser dari kondisi 2 menuju ke kondisi 3 akan terjadi perubahan fase dari uap jenuh menjadi cair jenuh, dimana refrijeran terkondensasi dan terjadi perpindahan panas dari refrijerasi kelingkungan sekitarnya yang lebih dingin. Untuk volume atur yang melingkupi refrijeran pada sisi kondenser, laju perpindahan panas dari refrijeran per satuan massa dari aliran refrijeran adalah.

$$\frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}} = h_2 - h_3 \dots \dots \dots (2.5)$$

Akhirnya, refrijeran pada kondisi 3 memasuki katup ekspansi dan berekspansi hingga mencapai tekanan epevaporator. Proses ini biasanya dimodelkan sebagai proses trotel dengan

$$h_4 = h_3 \dots \dots \dots (2.6)$$

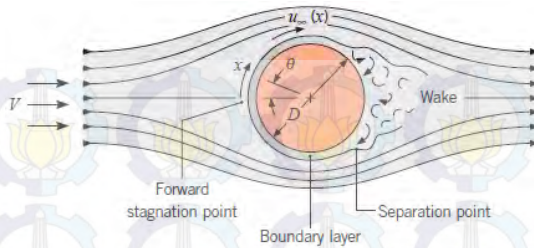


Tekanan refrigeran berkurang di dalam ekspansi adiabatik ireversibel, dan disertai dengan peningkatan entropi spesifik. Refrigeran keluar dari katup ekspansi pada kondisi 4 berupa campuran dua fase cair-uap.

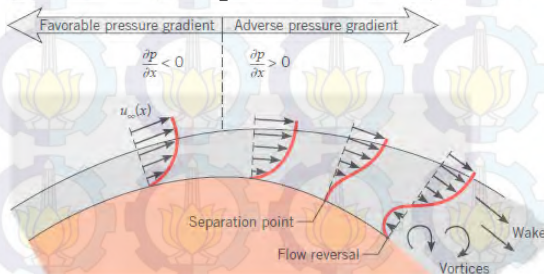
## 2.3 Tinjauan perpindahan panas

### 2.3.1 Aliran Fluida Melintasi Silinder Tunggal

Suatu aliran fluida eksternal yang melalui sebuah silinder tunggal dimana arah aliran tegak lurus terhadap sumbu silinder, seperti terlihat pada gambar 2.6. berdasarkan persamaan Euler untuk aliran *inviscid*,  $u_{\infty}(x)$  berbanding terbalik dengan  $p(x)$ . Dimulai dari titik stagnasi dengan tekanan yang besar dan  $u_{\infty} = 0$ , fluida akan mengalami akselerasi karena *favorable pressure gradient* ( $u_{\infty}/dx > 0$  ketika  $dp/dx < 0$ ), mencapai kecepatan maksimum pada  $dp/dx = 0$ , selanjutnya mengalami perlambatan karena adanya *adverse pressure gradient* ( $u_{\infty}/dx < 0$  ketika  $dp/dx > 0$ ). Sesaat fluida mengalami perlambatan, *gradient* kecepatan pada permukaan  $\partial u/\partial y|_{y=0}$  menjadi nol (gambar 2.7). Pada titik ini disebut sebagai titik separasi. Fluida didekat permukaan kekurangan momentum untuk melawan *pressure gradient* sehingga fluida tidak akan dapat bergerak maju. Dan *wake* akan terjadi pada daerah ini dengan ditandai adanya olakan yang tidak teratur. Titik stagnasi (*stagnation point*) merupakan titik dimana akan terpisahnya aliran dari permukaan silinder sirkular (*solid surface*) dan memiliki kecepatan fluida sesaat akan bernilai nol dan bertekanan tinggi. Semakin menjauh dari permukaan, pengaruh dari gaya gesek ini akan semakin melemah hingga batas dimana pengaruh dari gaya gesek ini tidak ada. Daerah ini yang dinamakan daerah *freestream*. Antara daerah *freestream* dengan permukaan benda akan terbentuk profil kecepatan akibat adanya gaya gesek. Batas yang memisahkan antara daerah *freestream* dengan daerah yang masih dipengaruhi gaya gesek itulah yang disebut dengan *boundary layer*.



Gambar 2.6 *Boundary Layer* dan Titik Separasi Pada Silinder Sirkular (Incopera dan DeWitt, 2007)



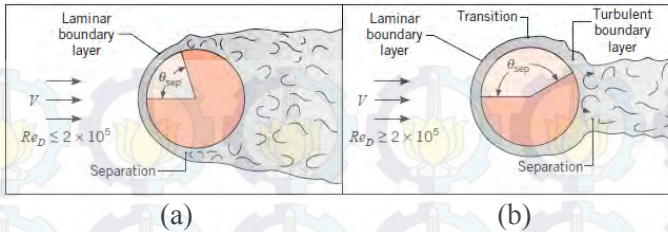
Gambar 2.7 Profil Kecepatan Pada Dinding Silinder (Incopera dan DeWitt, 2007)

Terbentuknya *boundary layer transition* dan posisi titik separasi tergantung pada Reynolds number. Untuk sirkular silinder panjang dimana panjang karakteristiknya berupa diameter, Reynolds number didefinisikan seperti pada persamaan 2.7

$$Re_D = \frac{\rho U D}{\mu} = \frac{U D}{\nu} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dengan momentum aliran pada turbulent *boundary layer* lebih besar dibanding dengan laminar *boundary layer* maka dapat disimpulkan bahwa aliran turbulent dapat menunda terjadinya separasi. Pada  $Re_D \leq 2 \times 10^5$  *boundary layer* yang terbentuk tetap laminar dan separasi yang terjadi pada  $\theta \approx 80^\circ$  (gambar 2.8 (a)) akan tetapi pada  $Re_D \geq 2 \times 10^5$  sudah terbentuk *boundary layer* transisi dan separasi tertunda pada  $\theta \approx 140^\circ$  (gambar 2.8 (b))

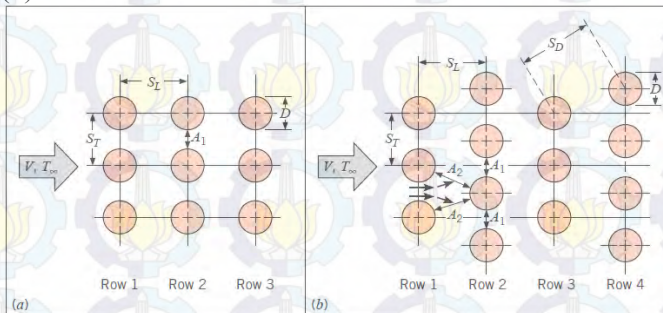




Gambar 2.8 Pengaruh Turbulensi Terhadap Titik Separasi (Incopera dan DeWitt, 2007)

### 2.3.2 Aliran Fluida Melintasi Tube Banks

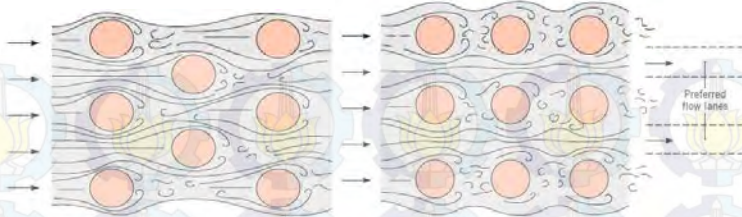
Berdasarkan dari tinjauan perpindahan panas, susunan *tube* terdiri dari dua jenis, sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 2.9 (a) dan (b)



Gambar 2.9 Jenis Susunan Tube (a) Susunan Aligned (b) Susunan Staggered (Incopera dan DeWitt, 2007)

Dari kedua bentuk susunan *tube* tersebut, tentunya bentuk aliran yang terbentuk berbeda satu sama lain. Dikarenakan aliran mengalir pada bagian sisi *fin* dan bagian sisi permukaan tube yang bersentuhan langsung dengan aliran yang mengalir tersebut. Adapun bentuk aliran yang mengalir melintasi *tube banks* dapat dilihat pada gambar 2.10 (a) dan (b).





Gambar 2.10 Aliran Fluida Melintasi Susunan *Tube Banks*,  
(a)susunan *Aligned* dan (b)Susunan *Staggered* (Incopera dan DeWitt, 2007)

Aliran melintasi tube pada baris pertama pada tube bank serupa dengan aliran yang melintasi *tube* tunggal secara tegak lurus. Untuk baris *tube* berikutnya, aliran sangat dipengaruhi oleh susunan *tube*. Pada susunan *tube aligned*, untuk baris kedua dan seterusnya telah terjadi turbulensi pada *upstream*. Nilai koefisien konveksi akan bertambah dengan bertambahnya jumlah baris sampai kira-kira baris kelima, setelah itu hanya ada sedikit perubahan pada turbulensi dan nilai koefisien konveksi. Untuk nilai  $S_T$  (*Transversal Pitch*) dan  $S_L$  (*Longitudinal Pitch*) yang kecil, *tube* pada baris pertama akan menghalangi turbulensi aliran dibaris berikutnya dan heat transfer akan berkurang karena sebagian besar permukaan tube tidak akan teraliri utama.

Pada umumnya, koefisien rata-rata perpindahan panas untuk *tube bundle* secara keseluruhan penting untuk diketahui. Untuk aliran udara yang melintasi *tube bundle* yang tersusun jumlah barisnya 10 atau lebih ( $N_L \geq 10$ ), Grimison menentukan korelasi dari persamaan 2.8.

$$\bar{Nu}_D = C_1 Re_{D,Max}^m \left[ \begin{array}{c} N_L \geq 10 \\ 2000 \leq Re_{D,Max} \leq 40.000 \\ P_r = 0,7 \end{array} \right] \dots\dots\dots (2.8)$$



Dimana nilai  $C_1$  dan  $m$  tercantum dalam tabel 2.1 dan nilai  $Re$  dapat dicari dengan persamaan 2.9

$$Re_{D,max} = \frac{\rho V_{max} D}{\mu} \dots \dots \dots (2.9)$$

Perumusan umum yang biasa digunakan untuk mendapatkan hasil lebih akurat, perumusan dikalikan dengan  $1,13 Pr^{1/3}$ , sesuai persamaan 2.10.

$$\bar{Nu}_D = 1,13 Re_{D,max}^m Pr^{1/3} \left[ \begin{array}{c} N_L \geq 10 \\ 2000 \leq Re_{D,max} \leq 40.000 \\ P_r = 0,7 \end{array} \right] \dots \dots \dots (2.10)$$

Tabel 2.1 konfigurasi susunan *tube* untuk aliran yang melintasi *tube banks* yang terdiri dari 10 baris atau lebih

$S_t/D$	$S_r/D$							
	1.25		1.5		2.0		3.0	
	$C_1$	$m$	$C_1$	$m$	$C_1$	$m$	$C_1$	$m$
Aligned								
1.25	0.348	0.592	0.275	0.608	0.100	0.704	0.0633	0.752
1.50	0.367	0.586	0.250	0.620	0.101	0.702	0.0678	0.744
2.00	0.418	0.570	0.299	0.602	0.229	0.632	0.198	0.648
3.00	0.290	0.601	0.357	0.584	0.374	0.581	0.286	0.608
Staggered								
0.600	—	—	—	—	—	—	0.213	0.636
0.900	—	—	—	—	0.446	0.571	0.401	0.581
1.000	—	—	0.497	0.558	—	—	—	—
1.125	—	—	—	—	0.478	0.565	0.518	0.560
1.250	0.518	0.556	0.505	0.554	0.519	0.556	0.522	0.562
1.500	0.451	0.568	0.460	0.562	0.452	0.568	0.488	0.568
2.000	0.404	0.572	0.416	0.568	0.482	0.556	0.449	0.570
3.000	0.310	0.592	0.356	0.580	0.440	0.562	0.428	0.574

Semua properti dari persamaan di atas dievaluasi pada temperatur film. Jika  $N_L < 10$ , faktor koreksi yang diaplikasikan yaitu sesuai persamaan (2.11)

$$\bar{Nu}_D \mid_{(N_L < 10)} = C_2 \bar{Nu}_D \mid_{(N_L \geq 10)} \dots \dots \dots (2.11)$$

Tabel 2.2 faktor koreksi  $C_2$  perumusan untuk  $N_L < 10$ 

$N_L$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Aligned	0.64	0.80	0.87	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	0.99
Staggered	0.68	0.75	0.83	0.89	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99

Bilangan Reynolds,  $Re_{D,max}$  berkorelasi dengan percepatan maksimum dari aliran yang melintasi tube banks. Untuk susunan secara *aligned*, kecepatan maksimum terjadi di  $A_1$ , sesuai dengan persamaan 2.12

$$V_{max} = \frac{S_T}{S_T - D} V \quad (2.12)$$

Sedangkan untuk susunan secara *staggered*, kecepatan maksimum dapat terjadi pada jarak transversal  $A_1$  dan jarak *longitudinal*  $A_2$ . Hal itu dapat terjadi di  $A_2$ , jika jarak antar baris *tube* memenuhi syarat seperti persamaan (2.13)

$$2(S_D - D) < (S_T - D) \quad (2.13)$$

Dari fluida yang bergerak dari  $A_1$  ke  $A_2$  maka  $V_{max}$  terjadi di  $A_2$  dengan syarat seperti pada persamaan (2.14)

$$S_D = \left[ S_L^2 + \left( \frac{S_T}{2} \right)^2 \right]^{1/2} < \frac{S_T + D}{2} \quad (2.14)$$

Maka, kecepatan maksimum pada susunan secara *staggered* di  $A_2$  sesuai persamaan (2.15)

$$V_{max} = \frac{S_T}{2(S_D - D)} V \quad (2.15)$$

Untuk susunan *staggered*, lintasan aliran utama lebih berliku-liku sehingga akan lebih banyak permukaan *tube* yang teraliri. Pada susunan *staggered*, kenaikan perpindahan panas dipengaruhi oleh tingkat lika-liku aliran terutama pada angka Reynolds yang kecil ( $Re < 100$ ).

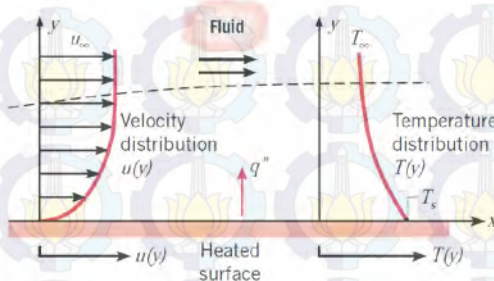
### 2.3.3 Perpindahan Panas Konveksi

Perpindahan panas secara konveksi terjadi apabila terdapat perbedaan temperatur antara permukaan suatu benda padat dengan fluida bergerak yang melintas di atas permukaan tersebut. Konveksi merupakan gabungan antara konduksi dan





adveksi. Gaya gesek terjadi antara fluida yang mengalir dengan permukaan benda, sebagaimana yang telah ditunjukkan pada gambar 2.11. Akibat adanya gaya gesek tersebut, fluida yang berada dipermukaan benda menjadi diam, ( $u_{y=0} = 0$ ). Pada saat fluida mempunyai kecepatan nol, akan terjadi perpindahan panas dari benda ke fluida secara konduksi, sedangkan pada fluida yang bergerak, ( $u_{y,} \neq 0$ ), terjadi proses perpindahan panas secara adveksi. Gabungan antara perpindahan panas secara konduksi dan adveksi inilah yang disebut dengan konveksi.



Gambar 2.11 Konveksi Aliran Melintasi Plat Datar (Incopera dan DeWitt, 2007)

Dengan mendefinisikan koefisien perpindahan panas rata-rata  $\bar{h}$ , maka perpindahan panas konveksi dinyatakan dengan hukum pendinginan Newton melalui persamaan 2.17. Besarnya laju perpindahan panas konveksi diperoleh dengan hukum Newton yaitu sebagai berikut:

$$q = \bar{h}A_s(T_s - T_\infty) \dots \dots \dots (2.17)$$

Keterangan :

$q$  = laju perpindahan panas konveksi (W)

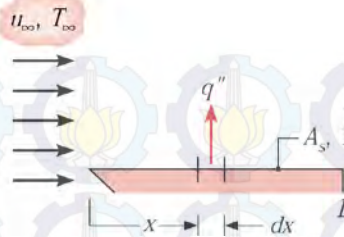
$A_s$  = luas permukaan perpindahan panas ( $m^2$ )

$\bar{h}$  = koefisien perpindahan panas konveksi rata-rata ( $W/m^2K$ )

$T_s$  = temperatur permukaan (K)

$T$  = temperatur fluida (K)





Gambar 2.12 Skema Perpindahan Panas Konveksi (Incropera dan DeWitt, 2007)

Gambar 2.12 menjelaskan, untuk setiap jarak  $x$  dari titik stagnasi, perpindahan panas lokal didapatkan dengan persamaan 2.18.

$$q_s'' = -k_f \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} \dots \dots \dots (2.18)$$

Persamaan ini dapat digunakan karena pada permukaan silinder, tidak ada gesekan fluida dan energi transfer hanya terjadi dengan konduksi. Dengan mengkombinasikan persamaan 2.17 dan persamaan 2.18, didapatkan koefisien perpindahan panas konveksi, seperti pada persamaan 2.19

$$h = \frac{-k_f \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}}{T_s - T_\infty} \dots \dots \dots (2.19)$$

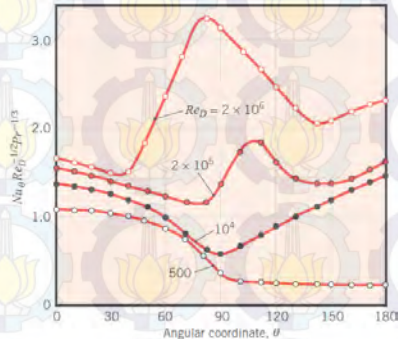
nilai  $h$  dan  $q''$  akan semakin turun dengan bertambahnya jarak  $x$ . Hal ini dikarenakan semakin besar jarak  $x$ , nilai  $\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}$  semakin kecil.

### 2.3.3.1 Konveksi Aliran melintasi Silinder Sirkular Tunggal

Akibat dari perbedaan profil kecepatan sebagaimana telah dijelaskan pada pendahuluan subbab 2.3.1 gambar 2.7, mengakibatkan variasi angka nusselt lokal pada silinder tersebut. Sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.13 untuk aliran dengan  $Re \geq 10^5$ , variasi dari  $Nu_\theta$  mempunyai dua harga minimum. Penurunan harga  $Nu_\theta$  yang terjadi mulai dari titik stagnasi dikarenakan pengembangan dari laminar *boundary layer*. Pada  $\theta$  antara  $80^\circ$  dan  $100^\circ$  terjadi kenaikan harga  $Nu_\theta$ , ini dikarenakan



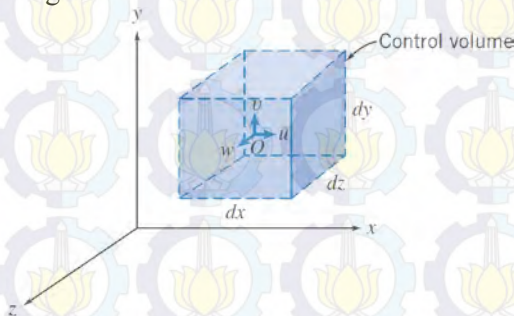
transisi *boundary layer* dari laminar menjadi turbulen. Dengan pengembangan *turbulent boundary layer* lebih lanjut, harga  $Nu_0$  menurun lagi. Pada saat separasi aliran terjadi pada  $\theta$  mendekati  $140^\circ$ ,  $Nu_0$  bertambah besar dikarenakan *mixing* didaerah *wake*.



Gambar 2.13 Distribusi Angka Nusselt pada Silinder Sirkular Tunggal (Incopera dan DeWitt, 2007)

## 2.4 Persamaan Dasar Aliran Fluida

Persamaan dasar fluida pada hakikatnya dapat dikembangkan dari prinsip dasar fisika yaitu konversi massa (*continuity*), persamaan momentum dan persamaan energi. Persamaan pada suatu fluida yang mengalir dengan kondisi dua dimensi dan *incompressible flow* pada *vertical channel* dapat dituliskan sebagai berikut:



Gambar 2.14 Volume Atur Pada Koordinat Rectangular (Fox, 2011)



Konservasi massa (*Continuity*)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (2.20)$$

Persamaan Momentum

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots (2.21)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots (2.22)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots (2.23)$$

Persamaan Energi

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\nu}{C_p} \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \dots\dots\dots (2.24)$$

## 2.5 Computational Fluid Dynamics (CFD)

*Computational Fluid Dynamics* (CFD) merupakan salah satu cara penggunaan komputer untuk menghasilkan informasi tentang bagaimana aliran fluida. CFD menggabungkan berbagai ilmu dasar teknologi diantaranya matematika, ilmu komputer, teknik dan fisika. Semua ilmu disiplin tersebut digunakan untuk permodelan atau simulasi aliran fluida.

Prinsip CFD adalah metode penghitungan yang mengkhususkan pada fluida, dimana sebuah kontrol dimensi, luas serta volume dengan memanfaatkan komputasi komputer maka dapat dilakukan perhitungan pada tiap-tiap elemennya.

### 2.5.1 Struktur Program CFD

Dalam proses kerjanya CFD melibatkan berbagai macam software atau program.

Program-program yang terlibat dalam CFD terbagi dua yaitu :

1. *Software* Utama

Yang dapat digunakan sebagai *software* utama di CFD adalah *Cosmosflowork* dan *Solidwork*

2. *Software* Pendukung





Yang termasuk dalam *software* pendukung di CFD adalah program *Exceed*, *Cosmosflowwork*, *GAMBIT* dan program-program CAD/CAE, seperti *AutoCad*, *CATIA*, *NASTRAN*, *ProEngineering*, dan lain-lain.

### 2.5.2 Tahapan Kerja dalam CFD

Secara umum langkah-langkah kerja dalam CFD terbagi atas tiga tahapan, yaitu:

1. *Preprocessor*

*Preprocessor* adalah tahapan di mana data di input atau dimasukkan, mulai dari pendefinisian kondisi batas (*boundary condition*) sampai pendefinisian domain.

2. *Processor*

Pada tahap ini dilakukan proses penghitungan data-data input dengan persamaan yang terlibat secara literatif, artinya penghitungan dilakukan hingga hasil menuju *error* terkecil atau hingga mencapai nilai yang konvergen.

3. *Postprocessor*

*Postprocessor* adalah tahapan dimana perhitungan diinterpretasikan ke dalam gambar, grafik bahkan animasi dengan pola-pola warna tertentu.

### 2.6 Grid Independency

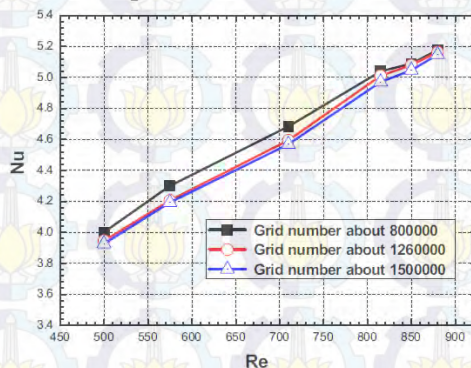
Pada suatu simulasi harus dilakukan grid independensi, untuk memastikan grid yang digunakan telah independen terhadap kasus yang akan disimulasikan. Salah satu cara agar dapat menguji grid independensi adalah dengan melakukan *adapt*. *Grid* independensi sendiri adalah solusi yang konvergen yang ditentukan dari perhitungan CFD yang tidak dipengaruhi oleh besar kecilnya *grid*. Apabila dengan meningkatkan jumlah dari sel maka kemungkinan tidak akan mengubah *flow-field solution* dan *integrated quantities*. Di dalam prakteknya *grid* independensi dilakukan dengan cara menghaluskan mesh sehingga hal tersebut dapat mengubah solusi numerik. Oleh karena itu dengan *adapt* dapat kita ketahui bagian-bagian mana saja yang harus lebih





dihaluskan mesh agar tidak mengubah solusi numerik. Pada pembahasan selanjutnya akan diambil contoh tentang kasus analisis perpindahan panas dan pressure drop untuk fin-and-tube heat exchanger dengan rectangular winglet-type vortex generator (He, dkk 2012).

Pada grid independensi ini dilakukan pembagian jumlah meshing ke dalam 3 jenis grid yang berbeda, yaitu *grid number* 800.000, 1.260.000, 1.500.000. Perhitungan dilakukan pada variasi Re dari 500 sampai 880.



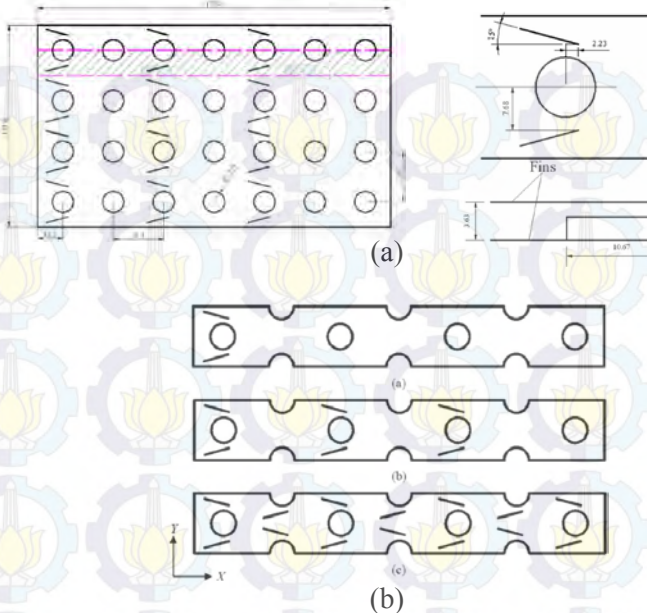
Gambar 2.15 Variasi dari Nilai Nusselt Number Terhadap Perbedaan Grid Number (He, dkk, 2012)

Dari gambar tersebut dapat kita lihat perubahan dari nilai Nusselt Number rata-rata dari ketiga jenis *grid number* tersebut. Dengan *grid number* 1260000 dan *grid number* 1500000 memiliki hasil yang hampir identik, sehingga dapat disimpulkan bahwa *grid number* 1260000 menunjukkan tingkat *grid independensi* yang cocok. Pada umumnya keakuratan dari metode solusi numerik yang baik diiringi dengan meningkatnya jumlah dari *cell*. Namun penggunaan dari jumlah *cell* yang banyak akan dibatasi dengan proses dari *hardware* computer dan waktu proses dari computer tersebut. Maka semua solusi numerik diolah dengan menggunakan *grid number* 1260000.

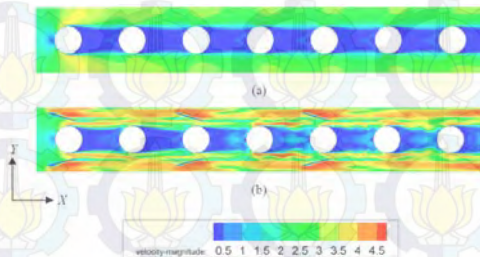


## 2.7 Penelitian Terdahulu

Dalam penelitian **Chu, dkk** (2009) berjudul “*Three-Dimensional Numerical Study of Flow and Heat Transfer Enhancement Using Vortex Generators in Fin-and-Tube Heat Exchangers*”, bilangan Reynolds divariasikan pada rentang 500-880, sementara pada permukaan *fin* dipasang *rectangular winglet pair* (RWP) dengan jumlah 1 R WP, 3 R WP dan 7 R WP sebagaimana ditunjukkan pada gambar 16 ( b). Melakukan simulasi numerik untuk mengetahui pengaruh penambahan *vortex generators* terhadap karakteristik aliran dan perpindahan panas pada *fin and tube heat exchanger* berbantuan *software fluent* dan GAMBIT untuk membuat pemodelannya. Kontur kecepatan dan temperatur lokal tube pada susunan inline model baseline (tanpa RWP) dibandingkan dengan penambahan 3-RWP disajikan pada gambar 2.17 dan 2.18. Penelitian ini menunjukkan adanya peningkatan koefisien perpindahan panas sebesar 28,1-43,9% untuk kasus 1-RWP, 71,3-87,6% untuk kasus 3-RWP dan 98,9-131% untuk kasus 7-RWP pada susunan *tube inline*. *Pressure drop* akan mengalami peningkatan sebesar 11,3-25,1% untuk kasus 1-RWP, 54,4-72% untuk kasus 3-RWP dan 88,8-121,4% untuk kasus 7-RWP pada susunan *tube inline*. Kasus 1-RWP *ratio j/f* akan bertambah dari 9,3% (pada susunan *tube* secara *staggered*) menjadi 19,3% (pada susunan *tube* secara *inline*). Kasus 3-RWP *ratio j/f* akan meningkat dari 2,6% (pada susunan *tube* secara *staggered*) menjadi 7,2% (pada susunan *tube* secara *inline*) dan untuk kasus pada 7-RWP *ratio j/f* akan bertambah dari 2,3% (pada susunan *tube* secara *staggered*) menjadi 7,1% (pada susunan *tube* secara *inline*) menunjukkan peningkatan perpindahan panas yang sama baiknya, sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 2.19.

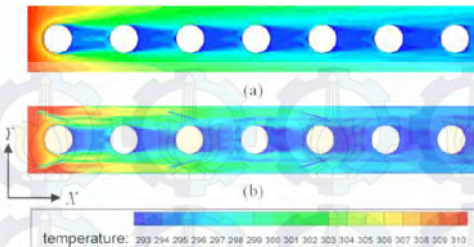


Gambar 2.16 (a) *Domain Compational* (kiri), Geometri *Tube* dan *RWP*, (b) variasi Jumlah *RWP* yang Terpasang Pada *Section Area* (Chu, dkk, 2009)

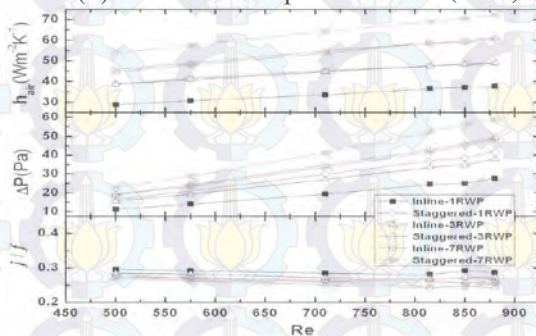


Gambar 2.17 Distribusi Kecepatan Lokal (a) Susunan *Tube* Secara *Baselines* dan (b) 3-*RWP Inline* pada  $Re=850$  (Chu, dkk, 2009)





Gambar 2.18 Distribusi Temperatur Lokal (a) susunan tube secara *baselines* dan (b) 3-RWP inline pada  $Re=850$  (Chu, dkk, 2009)

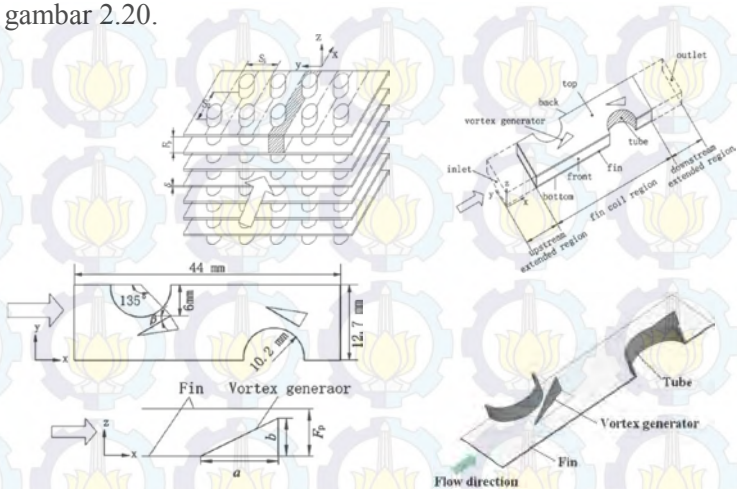


Gambar 2.19 (a) *Heat Transfer Coefficient*  $h_{air}$ , (b) *Pressure Drop*  $\Delta P$  dan (c) Performa  $j/f$  Keseluruhan Berbanding dengan Nilai  $Re$  (Chu, dkk, 2009)

Penelitian **Lei, dkk** (2010) melakukan penelitian tentang “*Hydrodynamics and Heat Transfer Characteristics of a Novel Heat Exchanger with Delta-Winglet Vortex Generators*”. Penelitian ini mensimulasikan pengaruh bilangan Reynolds dan posisi peletakan *vortex generators* pada rentang 600-2200 dan  $10^\circ$ - $15^\circ$  serta aspek rasio yang digunakan yakni 1-4 dengan menggunakan bantuan *software* CFD. Koefisien perpindahan panas meningkat seiring bertambahnya nilai *attack angle* dan aspek rasio sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.23. Jarak antar sirip (*fin pitch*,  $F_p$ ) adalah konstan sebesar 3,2 mm. Tinggi *delta-winglet vortex generators* yaitu  $b=0,8F_p$ , dengan menggunakan aspek rasio yang telah ditentukan sebesar 1-4 sehingga untuk mengetahui panjang dari delta winglet yaitu dapat



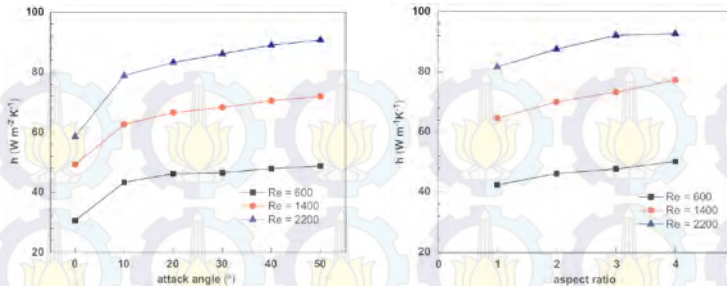
dicari dengan rumus  $\Lambda = \frac{b}{a}$  sebagaimana yang telah ditunjukkan pada gambar 2.20.



Gambar 2.20 Geometri Novel Heat Exchanger with Delta Winglet Vortex Generators (Lei, dkk, 2010)



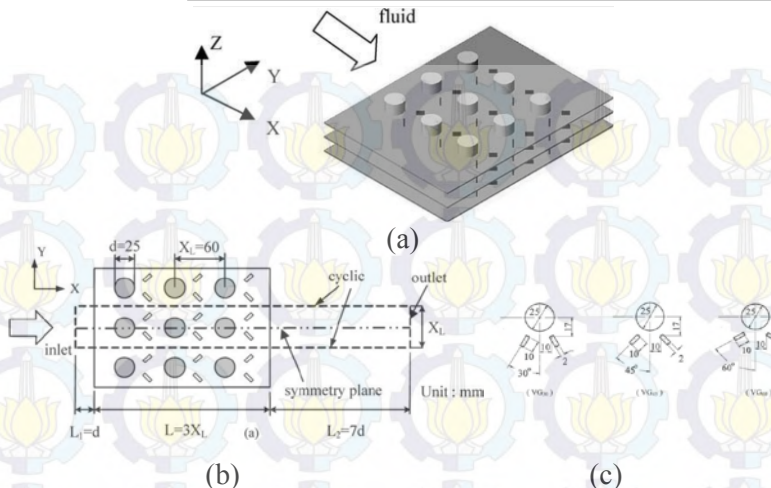
Gambar 2.21 Struktur Longitudinal Vortex Generators (Lei, dkk, 2010)



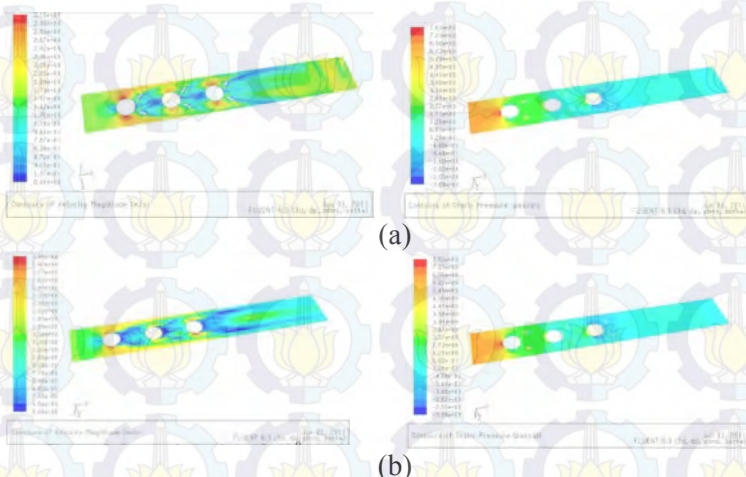
Gambar 2.22 Perbandingan Antara Koefisien Konveksi Pada  $Re$  sebesar 600, 1400 dan 2200 (a) Terhadap *Attack Angle* dan (b) Terhadap *Aspect Ratio* (Lei, dkk, 2010)

Penelitian **Kannan dan Kumar** (2011) berjudul “*Heat Transfer and Fluid Flow Analysis in Plate-Fin and Tube Heat Exchangers with Different Shaped Vortex Generators*” dilakukan simulasi numerik untuk mengetahui pengaruh parameter yang berbeda dari *vortex generators* pada *plate-fin* dan *tube heat exchanger*. Untuk *vortex generator* yang berbeda yaitu berbentuk *rectangular winglet* dan *delta winglet*. Karakteristik aliran dan perpindahan panas pada susunan *tube heat exchanger* yang disusun secara *inline*, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.24. Bilangan Reynolds dan posisi peletakan *vortex generators* divariasikan pada rentang (500-2500) dan ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$  dan  $60^\circ$ ) sebagaimana telah ditunjukkan pada gambar 2.23. Tiga baris *tube banks* yang disusun secara *inline* dengan adanya penambahan *vortex generator* berbentuk *delta winglet* menunjukkan adanya peningkatan rata-rata perpindahan panas sebesar 10-20% pada posisi sudut  $45^\circ$  dan ketika posisi *delta winglet* pada kemiringan sudut sebesar  $45^\circ$  *pressure drop* yang terjadi akan berkurang. Dengan permodelan menggunakan *software GAMBIT* dan disimulasikan pada *software FLUENT*, karakteristik aliran dan *static pressure* dapat diperoleh sebagaimana yang telah ditunjukkan pada gambar 2.24.





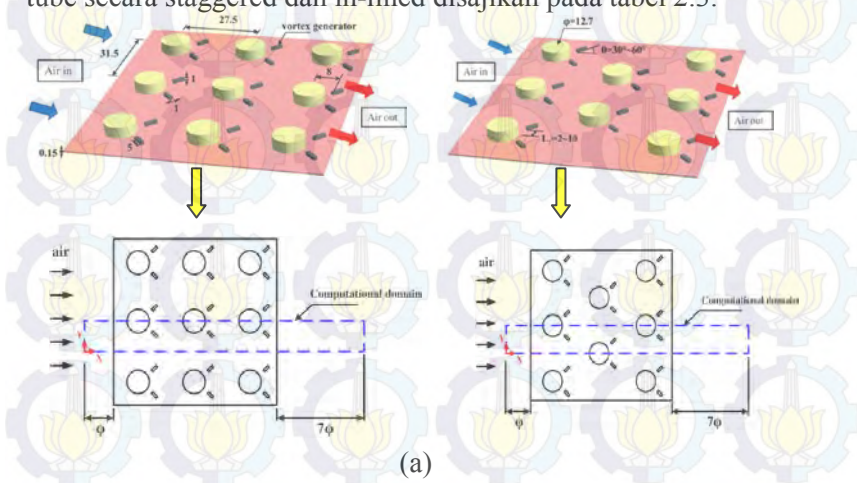
Gambar 2.23 (a) Geometri *Plate-Fins* dan *Tube Heat Exchangers* (b) *computational domain* (c) posisi sudut delta winglet (Kannan dan Kumar, 2011)

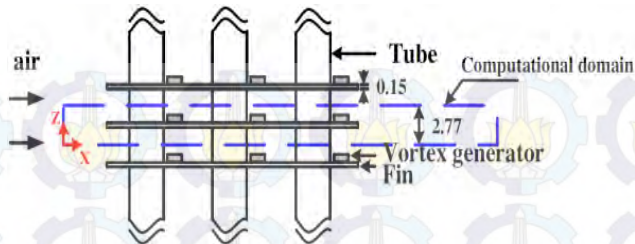


Gambar 2.24 Karakteristik Aliran dan Static Pressure (a) Rectangular Winglet 45° (b) Delta Winglet 45° (Kannan dan Kumar, 2011)

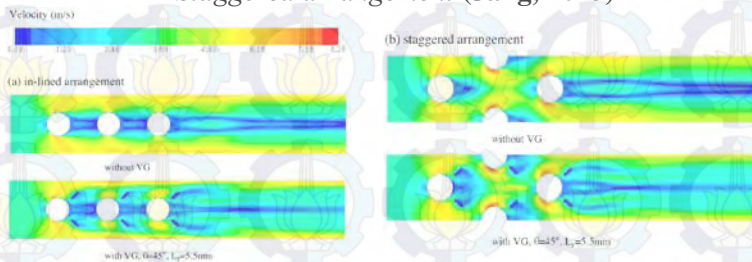


Penelitian **Jang, dkk.**, (2013) berjudul “*Optimization of the Span Angle and Location of Vortex Generators in a Plate-Fin and Tube Heat Exchanger*” dilakukan simulasi numerik untuk mengetahui pengaruh penambahan *vortex generators* pada fin and tube heat exchanger yang tersusun secara staggered dan inlined. Penelitian ini mengoptimalkan jarak sudut ( $\theta$ ) dan lokasi *transverse* ( $L_y$ ) dari *vortex generators* dengan metode numerik yang digunakan yaitu “*simplified conjugate-gradient method*” (SCGM). Bilangan Reynolds dan posisi peletakan vortex generators divariasikan pada rentang 400-1200 dan  $30^\circ$ - $60^\circ$  serta lokasi *transverse* ( $L_y$ ) yakni 2-10 mm sebagaimana yang telah ditunjukkan pada gambar 2.25. Geometri pemodelan dan computational domain pada susunan tube secara in-lined dan staggered. Dengan permodelan menggunakan *software GAMBIT* dan disimulasikan pada *software FLUENT*, karakteristik aliran dan temperatur dapat diperoleh sebagaimana yang telah ditunjukkan pada gambar 2.26 dan gambar 2.27. Hasil dari *area reduction ratio* dengan posisi sudut vortex generators dan lokasi *transverse* untuk nilai Reynolds yang berbeda-beda pada susunan tube secara staggered dan in-lined disajikan pada tabel 2.3.

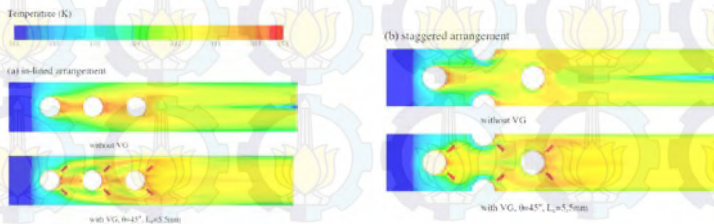




Gambar 2.25 Geometri Plate-Fins dan Tube Heat Exchangers dan Computational Domain (a) In-lined arrangement dan (b) Staggered arrangement (Jang, 2013)



Gambar 2.26 Perbandingan dari Distribusi Kecepatan Dengan Adanya Vortex Generators dan Tanpa Adanya Vortex Generators pada  $Re_{Dh} = 1200$  dan  $Z = 1,96$  mm (a) in-lined arrangement (b) staggered arrangement (Jang, 2013)



Gambar 2.27 Perbandingan dari Distribusi Temperatur Dengan Adanya Vortex Generators dan Tanpa Adanya Vortex Generators pada  $Re_{Dh} = 1200$  dan  $Z = 1,96$  mm (a) in-lined arrangement (b) staggered arrangement (Jang, 2013)





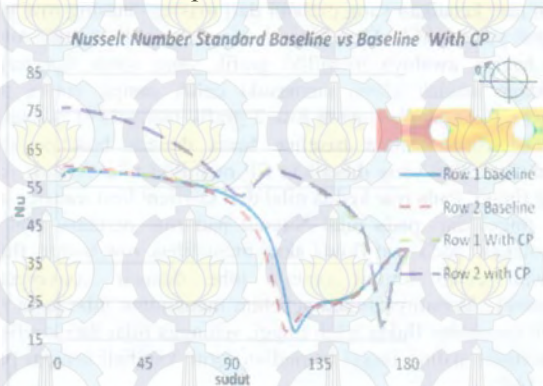
Tabel 2.3 Kombinasi optimum dari letak sudut ( $\theta$ ) dan lokasi *transverse* dari  $Re_{Dh}$  (a) *In-lined arrangement* (b) *Staggered arrangement* (Jang, 2013)

$Re_{Dh}$	$\theta$ (deg)	$L_y$ (mm)	Area reduction ratio (%)
(a) <i>In-lined arrangement</i>			
400	48.825	8.496	14.9
600	49.657	7.994	18.8
800	50.709	7.982	23.5
1000	51.594	7.498	24.4
1200	53.824	7.473	25.5
(b) <i>Staggered arrangement</i>			
400	51.514	7.498	7.9
400	51.514	7.498	7.9
600	52.556	6.982	10.3
800	48.853	6.972	11.7
1000	43.624	5.984	13.1
1200	41.883	5.498	13.6

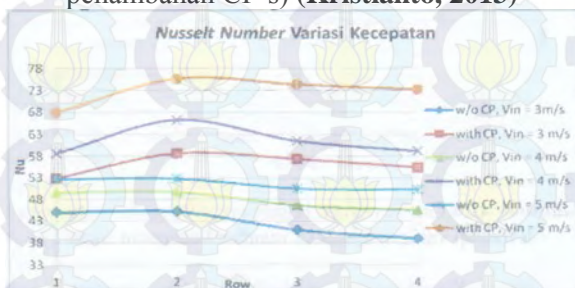
Penelitian **Kristianto** (2013) berjudul “*Studi Numerik Pengaruh Convergency Promoters (CP’s) terhadap Karakteristik Aliran dan Perpindahan Panas dengan  $\ell/D = 0.15$ , pada Tube Banks yang Tersusun Secara Staggered*”, untuk mengetahui pengaruh dari penambahan *CP’s* terhadap karakteristik aliran dan perpindahan panasnya. Tujuan dari penambahan *CP’s* diharapkan mampu meningkatkan laju perpindahan panas, posisi peletakan *CP’s* pada  $45^\circ$ , ada beberapa variasi yang dilakukan pada penelitian tersebut, yaitu dari variasi Reynolds Number (3000, 4000, 5000), kecepatan *inlet* (3m/s, 4m/s, 5m/s), seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.26. Pada empat baris tube banks yang tersusun secara *staggered* menunjukkan adanya peningkatan nilai Nusselt number rata-rata yang dihasilkan dari model *modified* dengan adanya penambahan *Convergency Promoters (CP’s)*, yakni besar peningkatannya berkisar antara 25,3-40,8% lebih tinggi dari pada Nusselt number pada standard *baseline* seperti pada gambar 2.27. Berdasarkan nilai koefisien *heat transfer* yang dihasilkan dari *baseline* yang dimodifikasi dengan diberi tambahan *Convergency Promoters (CPs)* mengalami peningkatan, yakni besar peningkatannya berkisar antara 25,8–40,6% lebih tinggi dari pada koefisien *heat transfer* pada standard *baseline*. Sebagaimana bisa di lihat pada gambar 2.28. Perpindahan panas yang terjadi pada model *modified* dengan adanya penambahan



*Convergency Promoters* (CPs) lebih baik dibandingkan dengan model *baseline*. Dilihat dari kenaikan nilai *Nusselt number* dan koefisien heat transfer dan didukung juga oleh visualisasi kontur kecepatan dan kontur temperatur.



Gambar 2.28 Grafik Perbandingan Nilai Nusselt Antara *Standard Baseline* (tanpa penambahan CP's) dan Model *Modified* (dengan penambahan CP's) (Kristianto, 2013)



Gambar 2.29 Grafik Perbandingan *Nusselt number* pada tiap Row Terhadap Variasi Kecepatan Inlet (Kristianto, 2013)



*Halaman ini sengaja dikosongkan*





### **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

Dalam menyusun tugas akhir ini, metode penelitian yang dipakai adalah simulasi numerik dengan perangkat lunak *Fluent* 6.3.26, dimana dalam tugas akhir ini akan dibandingkan hasil simulasi numerik *compact heat exchanger* tipe *continuous plate fin circular tube* tanpa atau dengan penambahan *obstacle* yang berbentuk *rectangular*. Simulasi numerik adalah sebuah proses simulasi berbasis perhitungan yang dilakukan oleh sebuah perangkat lunak komputer dengan mendefinisikan parameter-parameter yang sesuai dengan *boundary conditions*-nya, dilanjutkan proses iterasi atau pengulangan sampai tercapainya konvergensi untuk mendapatkan nilai pendekatan yang signifikan. Pada proses numerik ini terbagi menjadi 3 tahapan, yaitu *Pre-Processing*, *Processing*, dan *Post-Processing*.

#### **3.1. Pre-Processing**

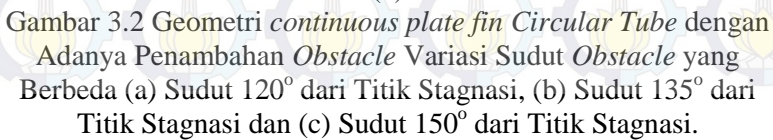
Proses ini dilakukan sebagai metode awal dalam penelitian untuk membangun dan menganalisa sebuah model komputasi (CFD) secara numerik. Tahapan *preprocessing* terdiri dari beberapa sub-tahapan antara lain :

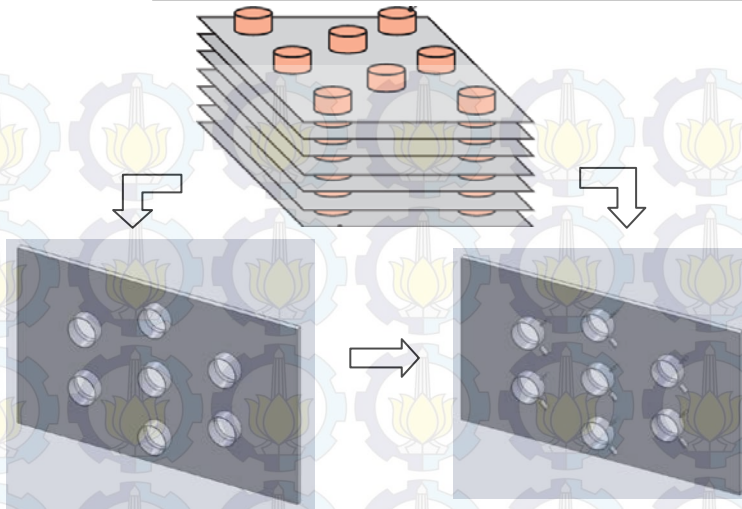
1. Pembuatan model,
2. Pembuatan *meshing*, dan
3. Penentuan kondisi batas (*Boundary Condition*) pada domain pemodelan.

Dari ketiga sub-tahapan diatas, semua tahapan diproses menggunakan perangkat lunak *GAMBIT* 2.2.30.

##### **3.1.1. Pembuatan model**

Model yang akan dibuat adalah *compact heat exchanger* tipe *continuous plate fin circular tube* tanpa adanya *obstacle* sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.1 dan dengan penambahan *obstacle* yang berbentuk *rectangular* pada gambar 3.2, dengan rincian ukuran tercantum pada tabel 3.1, dimana





Gambar 3.3 *Continuous Plate fin Circular Tube*, (a) Tanpa Penambahan *Obstacle* (b) dengan Penambahan *Obstacle*

Tabel 3.1 Geometri *Compact Heat Exchanger* Tipe *Continuous Plate fin Circular Tube*

Dimensi tube	nilai
Tube outside diameter (mm)	10
Transverse pitch, $S_T$ (mm)	20
Longitudinal pitch, $S_L$ (mm)	20
Diagonal pitch, $S_D$ (mm)	22.36
Tube row number	3
Gap, $g$ (mm)	1
<b>Fin</b>	
Air flow direction length (mm)	220
<b>Obstacle</b>	
Degree, $\theta$	120°, 135°, dan 150° (dari titik stagnasi)
Width, $t$ (mm)	0.5
Length, $l$ (mm)	2.5

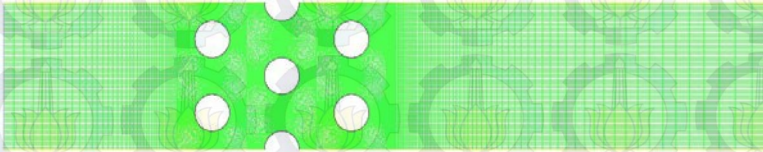




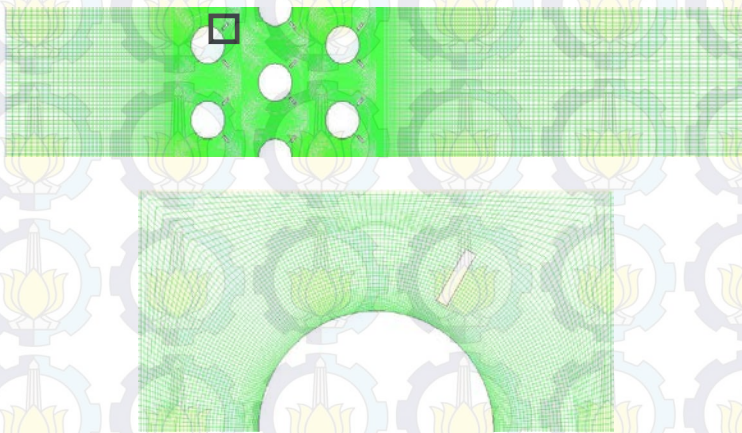
### 3.1.2. Pembuatan *Meshing*

Pemodelan yang telah dibuat dibagi menjadi elemen-elemen kecil sesuai batas dan parameter yang telah ditentukan. Bentuk *mesh* yang dipilih adalah *quadrilateral-map*. Setelah proses *meshing*, geometri model disimpan dan di-export ke bentuk format \*.msh agar dapat terbaca oleh perangkat lunak *FLUENT*.

*Meshing* untuk model 2D *compact heat exchanger* tipe *continuous plate fin circular tube* tanpa penambahan *obstacle* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.4 (a) atau dengan penambahan *obstacle* dengan variasi sudut yang berbentuk *ractangular* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.4 (b).



Gambar 3.4 (a) *Meshing* pada *Continuous Plate fin Circular Tube* Tanpa penambahan *Obstacle*



Gambar 3.4 (b) *Meshing* pada *Continuous Plate fin Circular Tube* Dengan penambahan *Obstacle*



Dari gambar 3.4 (a) dan (b) *meshing* lebih dirapatkan pada daerah didekat *tube* dan *obstacle* yang berbentuk *ractangular* (didefinisikan sebagai *wall*). Perapatan *mashing* pada bagian geometri tersebut dilakukan untuk meningkatkan ketelitian hasil simulasi. Fenomena dan karakteristik aliran yang dianalisa secara spesifik adalah daerah celah antar *fin* (*tube* dan *obstacle*)

### 3.1.3. Variabel Penelitian

Dalam suatu penelitian diperlukan variabel-variabel yang terkait didalamnya. Hal ini dimaksudkan agar penelitian mempunyai arah dan tujuan yang jelas mengenai hubungan yang akan dicari dalam suatu penelitian. Variabel-variabel yang ditentukan antara lain:

Variabel bebas : Domain *Obstacle* (berbasis titik separasi yang terjadi)

Variabel terkontrol : Kecepatan aliran masuk, *pitch tube*, temperatur *inlet*, dan temperatur *tube*

## 3.2. Processing

Pada tahapan ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *FLUENT* 6.3.26 yang terdiri dari beberapa tahapan dibawah ini:

### 3.2.1 Pemilihan Solver

Pada saat membuka perangkat lunak *FLUENT* terdapat pilihan untuk menggunakan *solver* 2D atau 3D dengan keakuratan tunggal atau ganda (*single precision/double precision*). Sesuai dengan batasan masalah yang telah ditentukan di BAB I, *solver* yang digunakan adalah 2D dengan keakuratan ganda. Keakuratan ganda untuk kasus perpindahan panas yang melibatkan perbedaan konduktivitas termal yang tinggi, jika menggunakan *single precision solver* dapat mengganggu konvergensi dan atau akurasi hasil iterasi.



Pada penelitian ini digunakan *solver segregated* untuk menyelesaikan persamaan yang ada. *Solver segregated* akan menyelesaikan persamaan-persamaan tersebut secara bertahap (terpisah antara satu persamaan dengan persamaan yang lain).

### 3.2.2 Pemilihan Turbulance Modelling

Penentuan *turbulance modelling* yang akan digunakan dalam simulasi ini mengacu pada penelitian terdahulu bahwa untuk pemodelan ini menggunakan metode *Turbulance Modelling* tipe k-epsilon RNG (*Re-Normalization Group*). Sehingga model *turbulance* ini digunakan sebagai acuan penelitian dalam pengambilan data. Model RNG k-epsilon diturunkan dengan menggunakan metode statistik yang teliti (teori renormalisasi kelompok). Bentuk persamaan yang digunakan sama dengan model k- $\epsilon$  standard tetapi melibatkan beberapa perbaikan:

- Model RNG mempunyai besaran tambahan pada persamaan laju disipasi, epsilon, yang dapat meningkatkan akurasi untuk aliran yang terhalang secara tiba-tiba.
- Efek putaran pada turbulensi juga terdapat pada model RNG, sehingga meningkatkan akurasi untuk aliran yang berputar (*swirl flow*).
- Model RNG menyediakan formula analitis untuk bilangan Prandtl turbulent, sementara model k-epsilon standard menggunakan nilai bilangan Prandtl yang konstan (ditentukan oleh pengguna).
- Model k-epsilon standard merupakan model untuk kasus dengan bilangan Reynolds tinggi, sedangkan model RNG menyediakan formula untuk bilangan Reynolds rendah.

### 3.2.3 Pemilihan Operating Condition

Langkah selanjutnya melakukan pengaturan *operation condition*. Kondisi operasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah tekanan operasi pada saat udara yang dimodelkan sebagai gas ideal melalui celah diantara dua *fin* dan *obstacle*. Pada penelitian ini tekanan operasi yang digunakan adalah 101325 Pa.





### 3.2.4 Penentuan Boundary Condition

Dalam mendefinisikan suatu kasus harus memasukkan informasi *variable* aliran pada domain kasus tersebut. Data yang diperlukan pada batas tergantung dari tipe kondisi batas yang digunakan. Dalam simulasi ini menggunakan kondisi batas yang tertera pada tabel 3.2, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.7 dengan properties fluida *inlet* yang tertera pada tabel 3.3.

Tabel 3.2 *Boundary Condition Continuous Plate Fin Circular Tube*

<i>Boundary Condition</i>	Keterangan
<i>Inlet</i>	Tipe : <i>Velocity Inlet</i> Kecepatan : 5 m/s Temperatur : 37°C
<i>Outlet</i>	Tipe : <i>Outflow</i>
<i>Tube</i>	Tipe : <i>Stationary Wall</i> Temperatur : 74°C Material : <i>Copper</i>
<i>Obstacle</i>	Tipe : <i>Stationary Wall</i>
Garis Bantu I	Tipe : <i>Interior</i>
Garis Bantu II	Tipe : <i>Symmetry</i>

Kecepatan inlet 5 m/s merupakan kecepatan yang dihasilkan oleh putaran dari fan pada kondensor AC-Split dengan kapasitas 1pk . Data tersebut berdasarkan data aktual dilapangan. Proses terjadinya kondensasi yang terjadi pada kondensor (AC-Split) apabila di tinjau dari termodinamika, merupakan proses isothermal dimana terjadi prose perubahan keadaan gas pada temperatur dan tekanan yang tetap pada susunan *tube* dikondensor.



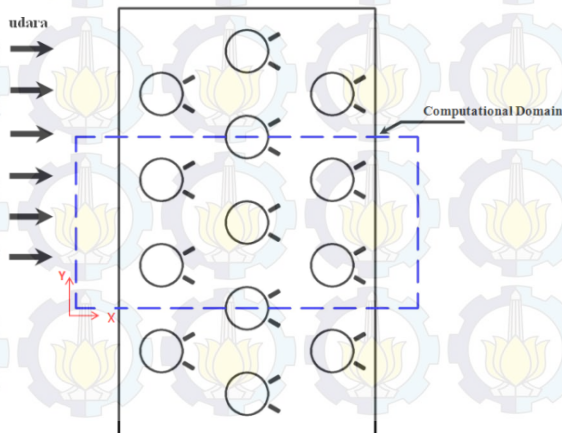
Tabel 3.3 Properties Fluida (Udara yang Dimodelkan sebagai gas ideal)

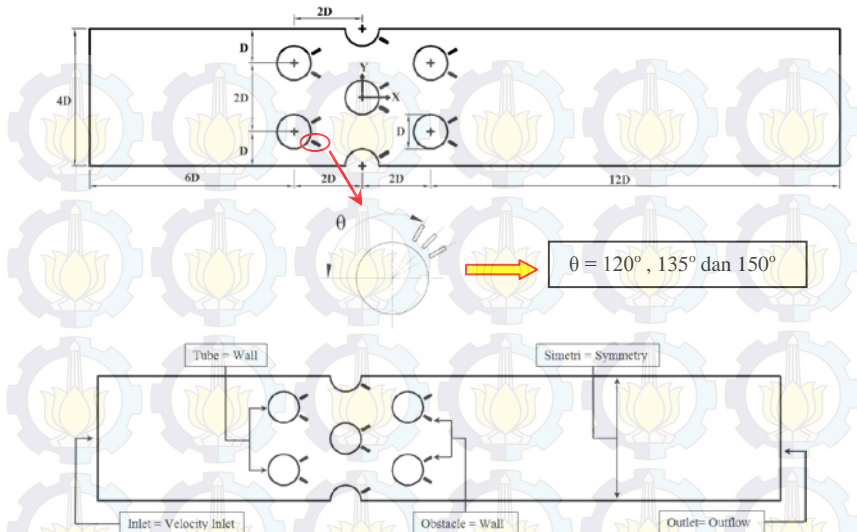
Temperature inlet ( $^{\circ}\text{C}$ )	37
Density ( $\text{kg/m}^3$ )	1,1281
Panas Spesifik ( $C_p$ ) ( $\text{KJ/kg.K}$ )	1,0074
Viskositas Absolut ( $\mu$ ) ( $\text{N.s/m}^2$ )	$1,89 \cdot 10^{-5}$
Viskositas Kinematik ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	$1,68 \cdot 10^{-5}$
Thermal Conductivity ( $\text{W/m.K}$ )	0,02704
Prandtl Number ( $Pr$ )	0,7056

Tabel 3.4 Properties Material Tube

Temperature Tube ( $^{\circ}\text{C}$ )	74
Density ( $\text{kg/m}^3$ )	8933
Panas Spesifik ( $C_p$ ) ( $\text{KJ/kg.K}$ )	386,136
Thermal Conductivity ( $\text{W/m.K}$ )	398,3

Dalam simulasi ini akan divariasikan sudut *obstacle* berbasis titik stagnasi. Dengan variasi tersebut diharapkan dapat dilakukan analisa koefisien konveksi untuk mengetahui peningkatan laju perpindahan panas yang terjadi.





Gambar 3.5 *Boundary Condition* pada domain pemodelan *Compact Heat Exchanger Tipe Continuous Plate fin Circular Tube* dengan Penambahan *Obstacle* yang Berbentuk *Ractangular*

### 3.2.5 Solving

#### 3.2.5.1 Solve Metode

Momentum dan *Energy* didiskritisasi dengan *second order upwind scheme*. *Coupling* antara *velocity* dan *pressure* ditampilkan dengan metode *simple algorithm*.

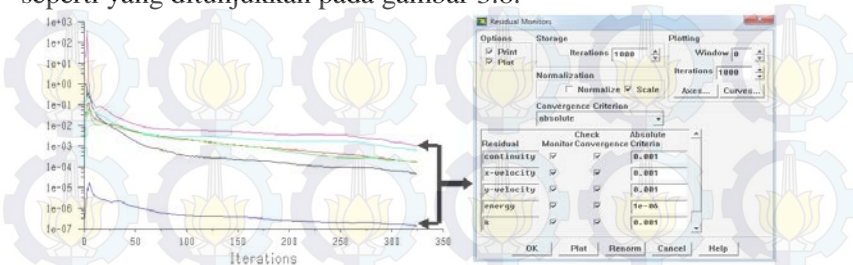
#### 3.2.5.2 Iterasi

Proses iterasi adalah proses perhitungan yang berulang-ulang dari kondisi batas yang diberikan sampai tercapainya konvergensi. Konvergensi dikatakan baik tidaknya hanya berdasarkan level residual konvergensi, pengamatan kesetimbangan atau balans massa dan energi juga harus diperhatikan. Metode umum yang digunakan untuk pengecekan konvergensi dari hasil iterasi, yaitu residual konvergensi. Residual konvergensi adalah batasan maksimal dalam hasil





perhitungan yang kriterianya dapat ditentukan sesuai keinginan, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.8.



Gambar 3.6 Kriteria Konvergensi

Pada umumnya makin kecil nilai konvergensi residual yang dicantumkan dalam proses itersi, proses itersi akan memakan waktu yang lebih lama hingga mencapai konvergensi, begitu pula sebaliknya. Namun peningkatan nilai konvergensi residual akan meningkatkan kualitas pengolahan data yang lebih baik.

### 3.3 Grid Independency

*Grid independency* dilakukan untuk memastikan *grid* yang telah independen terhadap kasus yang akan disimulasikan. Pada *grid independency* ini, dilakukan pembagian jumlah meshing ke dalam 4 jenis, kemudian dari jenis *meshing* ini akan dibandingkan dengan hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Menurut Jagadesh dan Murali (2005), keakuratan dari metode solusi numerik yang baik diiringi dengan meningkatnya jumlah dari *cell*. Namun penggunaan dari jumlah *cell* yang banyak akan dibatasi dengan proses dari *hardware* komputer dan waktu proses dari komputer tersebut. Pada penelitian ini akan digunakan analisa *grid independency* Nusselt number. Nilai  $Nu$  akan ditampilkan pada tabel 3.4.

Tabel 3.5 Skema *Grid* Independensi pada *baseline*.

Jenis Meshing	Jumlah Elemen (cells)	Nilai Nu avg	Nu avg (Khan, dkk 2006)	Error (%)
Meshing A	42484	55,37	47	0,15%
Meshing B	62016	55,60	47	0,15 %
Meshing C	108576	46,57	47	0,01%
Meshing D	125904	46,55	47	0,01%

Berdasarkan table 3.4 nilai Nu yang cenderung konstan terjadi pada meshing C dan meshing D. Salah satu pertimbangan dalam melakukan simulasi numerik adalah optimasi waktu dan memori yang digunakan, maka meshing yang digunakan adalah meshing C.

Langkah selanjutnya adalah validasi yang bertujuan untuk memastikan apakah metode penelitian telah sesuai dengan acuan yang digunakan, hal ini juga berlaku pada penelitian ini. Untuk memvalidasi metode numerik yang digunakan, data hasil numerik akan dibandingkan dengan hasil eksperimen yang dilakukan oleh Khan, dkk (2006) dan hasil numerik yang dilakukan oleh Chairunnisa dan Prabowo (2013) pada  $Re = 3 \times 10^3$ . Hasil dari validasi akan ditampilkan pada tabel 3.5.

Tabel 3.6 Nilai Nu avg model *baseline*

	Nilai Nu
Numerik ( <i>present</i> )	46,57
Khan, dkk (2006)	47
Chairunnisa dan Prabowo (2013)	43,57

Table 3.5 menunjukkan perbandingan nilai Nu antara hasil numerik dan eksperimen. Hasil dari perbandingan tersebut menunjukkan bahwa nilai Nu pada penelitian numerik ini memberikan kesesuaian antara penelitian eksperimen Khan, dkk (2006) dan penelitian numerik Chairunnisa dan Prabowo (2013).



### 3.4 Post processing

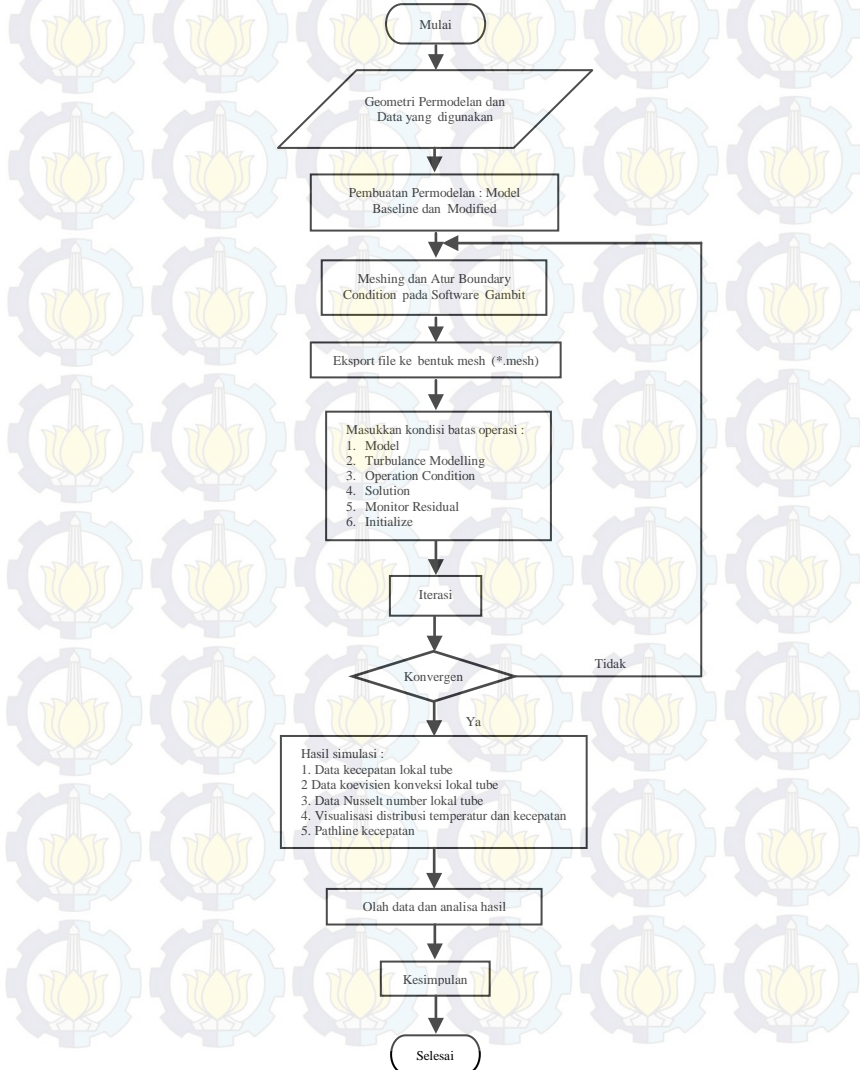
Proses ini merupakan proses akhir dari simulasi. Dimana hasil simulasi berupa data kualitatif dan kuantitatif. Data kuantitatif berupa visualisasi aliran dengan menampilkan pola aliran dalam *compact heat exchanger* tipe *Continuous Plate fin circular tube*. Data kuantitatif berupa distribusi kecepatan dan distribusi temperatur pada *compact heat exchanger* tipe *Continuous Plate fin circular tube*. Data kuantitatif tersebut akan diolah dengan perangkat lunak *microsoft excel 2010* untuk mendapatkan nilai kecepatan lokal, koefisien konveksi lokal, koefisien konveksi rata-rata, nusslet number lokal dan nusselt number rata-rata. Sehingga data kuantitatif tersebut dapat ditampilkan dalam bentuk grafik.





### 3.5 Flowchart Penelitian

Berikut ini adalah metode penelitian yang digunakan, seperti yang tercantum pada gambar 3.7.



Gambar 3.7 Flowchart Penelitian

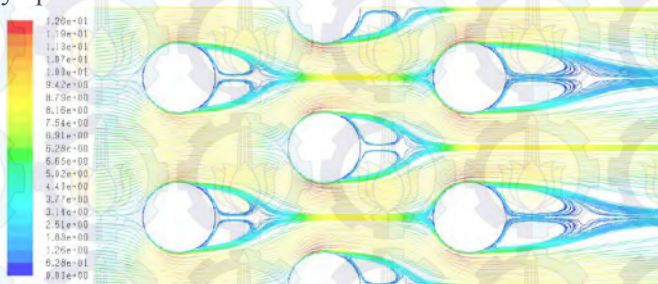




## BAB IV

### HASIL dan PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang analisa hasil dan pembahasan data dari hasil numerik. Data yang diperoleh dari penelitian ini berupa data kuantitatif dan kualitatif dari pemodelan *compact heat exchanger* tipe *Continuous Plate fin circular tube* dengan adanya penambahan *obstacle* dan tanpa adanya penambahan *obstacle*. Hasil dari pemodelan ini yaitu pola aliran dari masing-masing model *pathlines by velocity magnitude* (kecepatan), sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.1, kontur kecepatan, kontur temperatur dan karakteristik perpindahan panas yang disajikan dalam bentuk grafik meliputi pembahasan, Nusselt number lokal *tube* pada masing-masing baris pada susunan *tube* dan Nusselt number rata-rata pada *tube banks* yang tersusun secara *staggered* terhadap variasi posisi kemiringan sudut *obstacle*. Pada masing-masing analisa akan dibandingkan antara pemodelan *fin* dan *tube heat exchanger* dengan adanya penambahan *obstacle* dan tanpa adanya penambahan *obstacle*.



Gambar 4.1 Hasil Pemodelan: visualisasi *pathlines* pada model *baseline* (tanpa adanya penambahan *obstacle*)

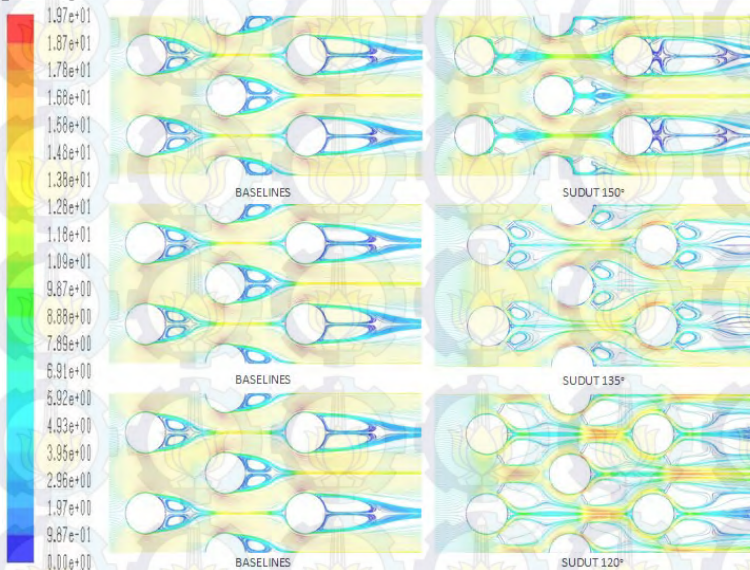
#### 4.1 Analisa Pola Aliran Terhadap Variasi Sudut *Obstacle*

Suatu aliran yang melintasi suatu bidang tentu akan membentuk suatu pola berdasarkan bentuk bidang yang dilewati. Dalam hal ini aliran yang akan ditinjau adalah aliran yang melewati *tube banks* yang tersusun secara *staggered* model





*baseline* (tanpa adanya penambahan *obstacle*) dan model *modified* (dengan adanya penambahan *obstacle*) yang berbentuk *rectangular* dengan kecepatan *inlet* sebesar 5 m/s, untuk posisi kemiringan sudut *obstacle* yang divariasikan masing-masing yaitu pada sudut  $150^\circ$ ,  $135^\circ$  dan  $120^\circ$ , berdasarkan titik pusat *tube* yang diukur dari *stagnation point* sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 4.2.



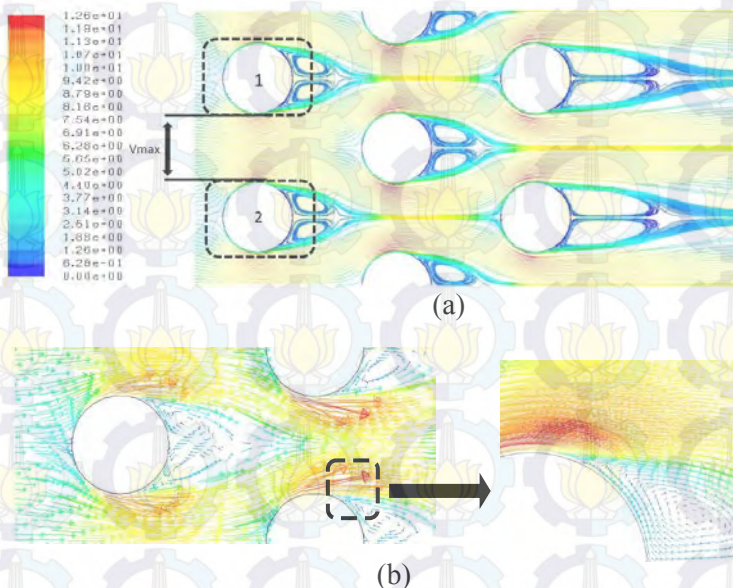
Gambar 4.2 Visualisasi *Pathlines by Velocity Magnitude*

#### 4.1.1 Model *Baseline* (tanpa adanya penambahan *obstacle*)

Berdasarkan gambar 4.3(a), fenomena yang terlihat untuk visualisasi *pathlines* model *baseline* (tanpa adanya penambahan *obstacle*), dapat dilihat bahwa pola aliran yang terbentuk ketika aliran akan melintasi susunan *tube* terjadi perlambatan kecepatan sebelum menumbuk *tube* di titik stagnasi pada baris pertama. Kemudian aliran terpecah mengalir ke dua arah yaitu mengalir ke bagian atas *tube* (*upper side*) dan bagian bawah *tube* (*lower side*). Saat aliran fluida mengalir diantara *tube* 1 dan *tube* 2 kecepatan aliran fluida akan memiliki kecepatan maksimum



karena adanya penyempitan celah yang dilalui oleh aliran fluida seperti pada gambar 4.3 (a). Hal ini sesuai dengan karakteristik fluida, apabila fluida yang melewati celah yang lebih sempit maka kecepatan dan tekanannya akan meningkat. Setelah aliran melewati celah diantara kedua *tube* tersebut ( $V_{\max}$ ), aliran menuju bagian belakang *tube* dan aliran terseparasi (aliran memisah). Sebagian aliran menuju *tube* berikutnya dan sebagian lagi berolok (*vortex*) dibagian belakang *tube* dan tidak langsung mengalir menuju *tube* berikutnya, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.3(b).

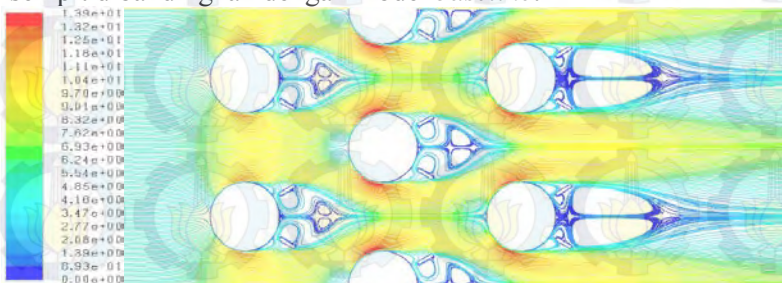


Gambar 4.3 Visualisasi Pola Aliran *Baseline* (tanpa penambahan *Obstacle*) (a) Posisi Kecepatan Maksimum dan (b) Perbesaran untuk daerah separasi



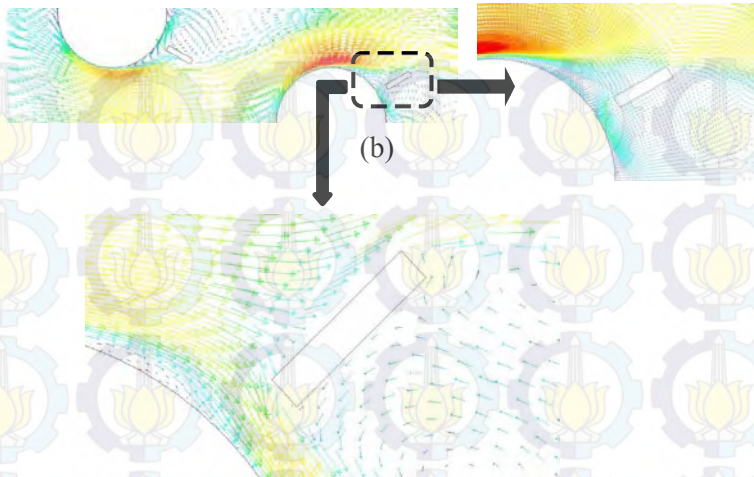
#### 4.1.2 Pengaruh Adanya Penambahan *Obstacle* (model *modified*) Pada Model *Baseline*

Berdasarkan fenomena yang terlihat dalam visualisasi *pathlines* model *modified* (adanya penambahan *obstacle*) pada gambar 4.4(a), dapat dilihat bahwa pola aliran yang terbentuk ketika aliran akan melintasi susunan *tube* terjadi perlambatan kecepatan sebelum menumbuk *tube* pada titik stagnasi pada tube baris pertama, kemudian aliran terpecah mengalir ke dua arah yaitu mengalir kebagian atas *tube* (*upper side*) dan kebagian bawah *tube* (*lower side*). Pada bagian atas dan bawah *tube* aliran terpecah lagi mengalir kebagian atas dan bawah *obstacle* untuk diarahkan ke *tube* berikutnya. Saat aliran mengalir di kedua bagian tersebut kecepatan lokal *tube* memiliki kecepatan maksimum karena adanya penyempitan celah laluan aliran (antara *tube* dan *obstacle* serta antara *obstacle* yang satu dengan yang berada pada satu baris *tube* yang sama) seperti pada gambar 4.4(b). Hal ini sesuai dengan karakteristik aliran fluida yang apabila melewati celah yang lebih sempit maka kecepatan dan tekanannya akan meningkat. Setelah aliran melewati celah sempit ( $V_{\max}$ ) aliran akan menuju kebagian belakang *tube* (*downstream*) dan aliran terseparasi (aliran memisah). Sebagian aliran menuju *tube* berikutnya dan sebagian lagi berolak (*vortex*) dibagian belakang *tube* dan *obstacle* tidak langsung mengalir menuju *tube* berikutnya, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.4(b). *Vortex* yang terbentuk dibelakang *tube* untuk model *modified* ini semakin sempit dibandingkan dengan model *baseline*.



(a)



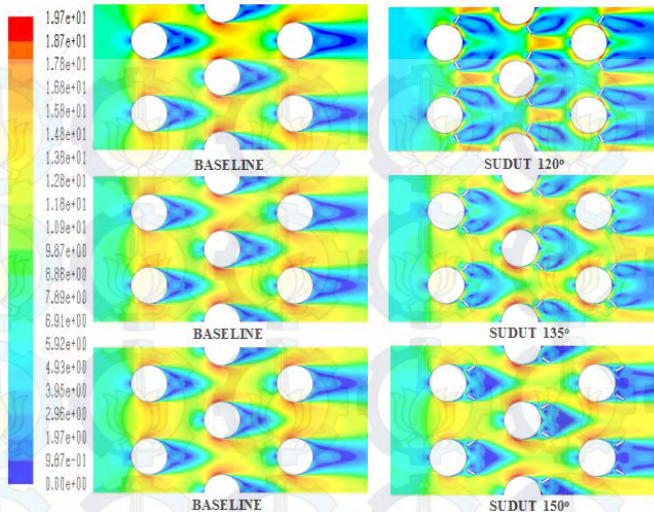


Gambar 4.4 Visualisasi Pola Aliran Model *Modified* (dengan penambahan *Obstacle*) (a) Pola Aliran by *Pathlines Velocity* dan (b) Perbesaran untuk sudut *obstacle*  $150^\circ$  pada Daerah *Downstream* ( $\theta=90^\circ$ )

## 4.2 Pengaruh Variasi Sudut *Obstacle*

### 4.2.1 Kontur Kecepatan

Berdasarkan gambar 4.5 terlihat visualisasi aliran berdasarkan kontur kecepatan (*contour of velocity magnitude*) untuk model *baseline* (tanpa adanya penambahan *obstacle*) dan aliran untuk model *modified* (adanya penambahan *obstacle*) dengan posisi kemiringan sudut  $150^\circ$ ,  $135^\circ$ , dan  $120^\circ$  (berdasarkan titik pusat *tube* yang diukur dari *stagnation point*) disepanjang permukaan *tube* pada baris pertama sampai baris ketiga.



Gambar 4.5 Visualisasi Kontur Kecepatan

#### 4.2.1.1 Model *Baseline* (tanpa adanya penambahan *obstacle*)

Berdasarkan gambar 4.5 pada bagian atas untuk kecepatan *inlet* 5m/s merupakan fenomena kontur kecepatan model *baseline* (tanpa adanya penambahan *obstacle*), pola aliran udara melewati susunan *tube staggered arrangement*, secara garis besar pola aliran yang terbentuk disekitar susunan *tube* model *baseline* akan sama dengan pola aliran yang terjadi pada silinder tunggal, yaitu kecepatan aliran fluida akan mendekati nilai nol pada daerah depan *tube* (*stagnation point*), kemudian kecepatan akan meningkat mengikuti kontur dari *tube* sampai kecepatan maksimum kemudian kecepatannya akan menurun sampai daerah separasi (*separation point*) dan terjadi aliran balik yang terjadi dibelakang *tube* (*downstream*). Aliran yang melewati celah antar *tube* 1 (atas) dan *tube* 2 (bawah) pada *row* pertama akan mengalami peningkatan kecepatan, hal ini sesuai dengan karakteristik fluida yaitu akan mengalami kenaikan kecepatan apabila melewati celah yang sempit. Kemudian aliran fluidanya akan bisa difokuskan pada *tube row* selanjutnya.



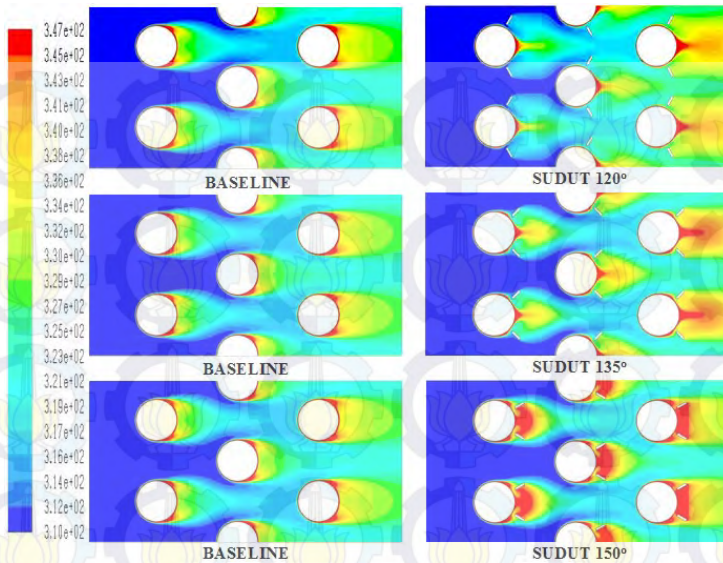
#### 4.2.1.2 Pengaruh adanya penambahan *obstacle* (model *modified*) pada model *baseline*

Berdasarkan fenomena yang terlihat dalam visualisasi kontur kecepatan model *modified* pada gambar 4.5, dapat dilihat bahwa pada *tube* baris pertama, aliran mengalami kenaikan kecepatan setelah melewati celah sempit antara *tube* dan *obstacle* dan celah pada daerah penambahan *obstacle*. Pada *tube* berikutnya, *tube* baris kedua aliran yang diteruskan oleh *obstacle* menuju *tube* baris ketiga mengakibatkan mengalami kenaikan diseluruh permukaan *tube* pada baris ini dengan kecepatan maksimum ( $V_{\max}$ ) berada pada celah antara *tube* dan *obstacle*. Pada *tube* baris ketiga dan seterusnya akan mempunyai pola aliran yang relatif sama dan tidak terlalu signifikan perubahan kontur kecepatannya. Peningkatan kecepatan akibat penambahan *obstacle* ini sangat signifikan jika dilihat dari garis-garis warna merah yang tercantum dalam gambar 4.5 mengenai visualisasi kontur kecepatan. Sehingga titik separasi yang terjadi pada *tube* selanjutnya akan terjadi lebih cepat.

#### 4.2.2 Kontur Temperatur

Berdasarkan gambar 4.6 terlihat visualisasi pola aliran yang terbentuk berdasarkan *contours of static temperature* (K) aliran untuk model *baseline* (tanpa adanya penambahan *obstacle*) dan model *modified* (adanya penambahan *obstacle*) dengan kecepatan *inlet* sebesar 5m/s. Pada kedua model ini, *temperature inlet* (udara) yaitu 37° C dan *temperature tube* konstan yaitu 74°C atau masing-masing dalam *Kelvin* yaitu 310 K dan 347 K. Distribusi *temperature* untuk kedua model ini dapat diartikan dari kelompok warna yang terbentuk, dengan indikasi warna merah memiliki temperatur yang paling tinggi dan temperatur paling rendah diindikasikan oleh warna biru tua.





Gambar 4.6 Visualisasi Kontur Temperatur

#### 4.2.2.1 Model *Baseline* (tanpa adanya penambahan *obstacle*)

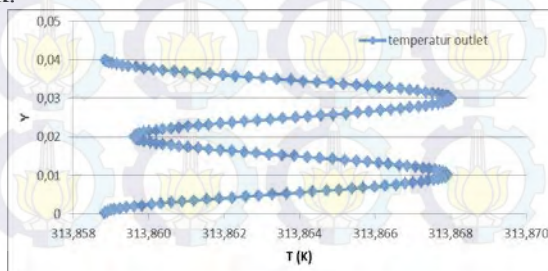
Berdasarkan fenomena yang terlihat dalam visualisasi model *baseline* (tanpa adanya penambahan *obstacle*) pada gambar 4.6 dapat dilihat bahwa dengan kecepatan *inlet* ( $V_{inlet}$ ) menunjukkan sudah bertambahnya temperatur *inlet* pada *tube* baris kedua, dan *tube* baris ketiga. Bertambahnya temperatur pada masing-masing baris membentuk tingkatan temperatur dengan temperatur tertinggi pada sisi *tube*, pada sekitar *tube* baris kedua temperaturnya lebih tinggi dari sekitar *tube* baris pertama, pada sekitar *tube* baris ketiga temperaturnya lebih tinggi dari sekitar *tube* baris kedua dan temperatur tertinggi ada pada sisi *outlet*. Distribusi temperatur inlet sekitar permukaan *tube* terlihat bahwa adanya perubahan warna biru tua dan warna lainnya. Hal ini disebabkan oleh temperatur pada sisi *tube* yang lebih tinggi dari pada temperatur *inlet*. Sesuai dengan karakteristik perpindahan panas bahwa temperatur yang tinggi mengalir ke temperatur yang lebih rendah



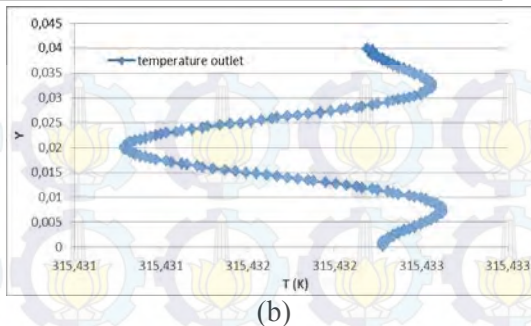
#### 4.2.2.2 Pengaruh adanya penambahan *obstacle* (model *modified*) pada model *baseline*

Berdasarkan fenomena yang terlihat dalam visualisasi model *modified* (adanya penambahan *obstacle*), dapat dilihat bahwa pada *tube* baris pertama, aliran mengalami peningkatan temperatur yang cukup signifikan setelah aliran melewati *tube* baris pertama dan *obstacle*. Dengan adanya *obstacle* yang terpasang disekitar *tube* baris pertama akan memfokuskan temperatur udara *inlet* untuk menuju *tube* pada baris kedua (gambar 4.6), dalam hal ini memaksimalkan perpindahan panas antara *tube* pada baris kedua dengan udara inlet. Tidak hanya memaksimalkan perpindahan panas pada *tube* baris kedua tetapi juga pada *tube* baris ketiga. Berdasarkan visualisasi *contours of total temperature* dengan adanya penambahan *obstacle* dapat dilihat bahwa model *baseline* dan model *modified*, pada temperatur *outlet* model *modified* akan lebih tinggi jika dibandingkan dengan model *baseline*.

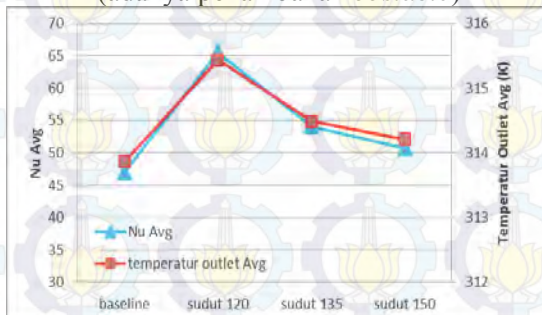
Berdasarkan gambar 4.7 mengenai grafik distribusi temperatur *outlet* dapat dilihat perbedaan antara model *baseline* (tanpa adanya penambahan *obstacle*) dan model *modified* (dengan adanya penambahan *obstacle*). Temperatur outlet model *baseline* lebih rendah jika dibandingkan dengan model *modified* (dengan penambahan *obstacle* posisi sudut  $120^\circ$ ). Hal tersebut diakibatkan oleh adanya penambahan *obstacle* yang dapat meningkatkan kecepatan *outlet*nya sehingga perpindahan panasnya menjadi lebih baik.



(a)



Gambar 4.7 Distribusi *Temperature Outlet* (a) Model *Baseline* (tanpa adanya penambahan *obstacle*) dan (b) Model *Modified* (adanya penambahan *obstacle*)



Gambar 4.8 Temperatur Rata-rata *Outlet* dan Nilai Nusselt number Rata-rata

Berdasarkan pada gambar 4.8 mengenai informasi tentang temperatur rata-rata *outlet* dan Nilai Nusselt number rata-rata untuk masing-masing variasi dapat dilihat bahwa rata-rata temperatur *outlet* dan nilai Nusselt number akan konsisten mengalami peningkatan seiring dengan penambahan *obstacle* dengan memvariasikan sudut kemiringan *obstacle*. Temperatur rata-rata *outlet* pada posisi kemiringan *obstacle* sebesar  $120^\circ$  memiliki nilai temperatur dan Nusselt number rata-rata tertinggi jika dibandingkan dengan variasi kemiringan sudut yang lain. Akan tetapi mengalami penurunan nilai rata-rata seiring dengan bertambahnya posisi sudut.





### 4.3 Analisa Karakteristik Perpindahan Panas Pengaruh Penambahan *Obstacle*

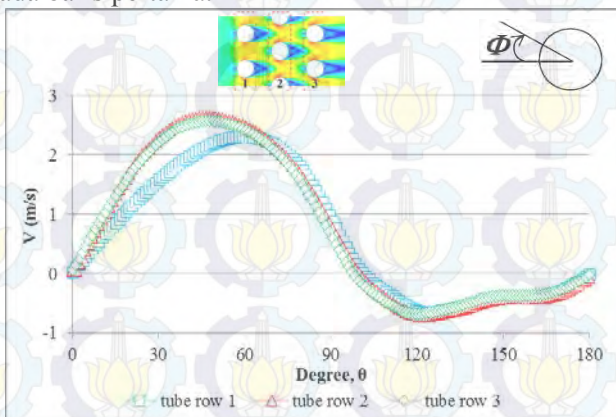
#### 4.3.1 Kecepatan Lokal *Tube*

Berdasarkan pada gambar 4.9 mengenai grafik distribusi kecepatan lokal *tube* pada model *baseline* (tanpa adanya penambahan *obstacle*) dapat dilihat bahwa kecepatan lokal *tube* saat posisi aliran udara melintasi sudut  $0^\circ$  maka kecepatan lokal *tube* akan bernilai 0 m/s. Hal ini disebabkan adanya pengaruh *stagnation point* pada sudut tersebut, dimana aliran udara pada kecepatan tinggi harus berhenti sesaat ketika menumbuk *tube*. Selanjutnya aliran udara akan terpecah menjadi dua bagian aliran yang mengalir yaitu aliran yang mengalir kebagian atas *tube* (*upper side*) dan yang mengalir kebagian bawah *tube* (*lower side*). Dimana, saat aliran melintasi kedua bagian tersebut akan terjadi peningkatan kecepatan (tekanan menurun,  $\frac{\partial P}{\partial x} < 1$ , *favorable pressure gradient*) sampai posisi aliran  $\theta \cong 60^\circ$  ( $V_{maks}$ ) kondisi pada *tube* baris pertama. Setelah aliran melewati posisi tersebut, aliran menuju kebagian belakang *tube* (sisi *downstream*) yang diindikasikan dengan adanya penurunan kecepatan dan adanya peningkatan tekanan (*adverse pressure gradient*,  $\frac{\partial P}{\partial x} > 1$ ) pada posisi aliran melintasi sudut  $60^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$  dan kemudian aliran akan terseparasi pada sudut  $\theta = 100^\circ$  dimana momentum aliran tidak mampu lagi menahan *adverse pressure gradient* dan *effect friction*. Sehingga aliran akan terlepas dari kontur *body tube* yang diindikasikan dengan kecepatan yang bernilai 0 m/s. Kecepatan lokal *tube* yang bernilai negatif dikarenakan adanya *back pressure* yang menyebabkan aliran berolak (*vortex*) pada posisi aliran sudut  $102^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ .

Pada trend grafik kecepatan lokal *tube* model *baseline* (tanpa adanya penambahan *obstacle*), sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 4.9 menunjukkan bahwa antara *tube* pada baris pertama sampai ketiga memiliki kecepatan lokal yang berbeda-beda. *Tube* pada baris pertama menunjukkan adanya peningkatan kecepatan saat aliran melintasi *tube* hingga posisi  $\theta$



$\approx 60^\circ$  dan posisi aliran  $60^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$ , kecepatan lokal *tube* mulai mengalami penurunan. Sedangkan pada *tube* baris ke dua menunjukkan adanya peningkatan kecepatan pada posisi aliran  $\theta \approx 46^\circ$ , tetapi kecepatan *tube* pada baris kedua mengalami penurunan kecepatan saat posisi aliran melintasi sudut  $46^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$ . Jika dilihat dari posisi aliran saat mengalami peningkatan kecepatan, maka *tube* pada baris kedua dan ketiga memiliki kecepatan lokal yang lebih tinggi dibandingkan kecepatan lokal *tube* pada baris pertama.



Gambar 4.9 Distribusi Kecepatan Lokal *Tube* Model *Baseline* (tanpa penambahan *Obstacle*)

Pada trend grafik distribusi kecepatan lokal model *modified* (dengan adanya penambahan *obstacle*), sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.10. *Tube* pada baris pertama menunjukkan adanya peningkatan kecepatan (tekanan menurun,  $\frac{\partial P}{\partial x} < 1$ , *favorable pressure gradient*) pada posisi aliran  $\theta \approx 60^\circ$  namun pada saat  $0^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$  *tube* pada baris ini memiliki kecepatan yang sama dengan *tube* baris pertama pada model *baseline*. Hal ini dikarenakan pada posisi tersebut belum adanya pengaruh dari penambahan *obstacle*. Saat posisi aliran  $70^\circ \leq \theta \leq 95^\circ$ , kecepatan lokal *tube* mulai mengalami penurunan. Hal ini



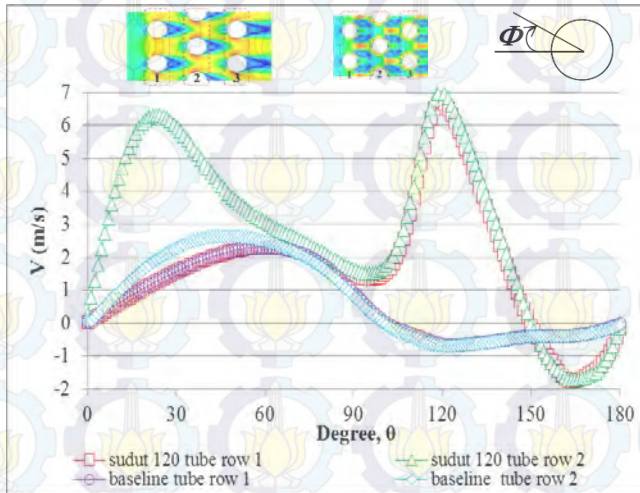
dikarenakan adanya peningkatan tekanan yang terjadi (*adverse pressure gradient* ,  $\frac{\partial P}{\partial x} > 1$  ). Kemudian mengalami peningkatan kecepatan pada posisi aliran  $95^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$  . Saat posisi aliran  $95^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$  , kecepatan lokal *tube* kembali mengalami penurunan. Sedangkan *tube* pada baris kedua, pada posisi aliran pada  $0^\circ \leq \theta \leq 23^\circ$  , mengalami peningkatan kecepatan yang signifikan namun setelah melewati sudut  $23^\circ$  kecepatan lokal pada *tube* baris ini mengalami penurunan sampai  $\theta \cong 95^\circ$  . Kemudian mengalami peningkatan kecepatan kembali sampai posisi aliran pada  $\theta \cong 120^\circ$  dan mengalami penurunan yang signifikan sampai posisi aliran pada  $\theta \cong 150^\circ$  . Untuk kedua baris *tube* , setelah aliran melintasi *tube* pada posisi sudut  $\theta \cong 150^\circ$  (pada sudut ini mulai terjadinya separasi yang dikarenakan momentum aliran sudah tidak mampu lagi menahan *adverse pressure gradient* dan *effect friction* ). Kecepatan lokal *tube* memiliki nilai yang negatif hingga  $\theta \cong 180^\circ$  dikarenakan adanya back pressure yang menyebabkan aliran berolak-olak (*vortex* ). Adanya peningkatan kecepatan kembali pada model *modified* ini dikarenakan selain celah sempit yang terbentuk antara *obstacle* satu dan yang lainnya, celah sempit lain yaitu adanya celah antara tube dengan *obstacle* .

Perbedaan distribusi kecepatan lokal *tube* antara model *baseline* (tanpa adanya penambahan *obstacle* ) dan model *modified* (dengan adanya penambahan *obstacle* ) menunjukkan bahwa antara tube pada baris pertama dan kedua untuk masing-masing memiliki kecepatan lokal *tube* yang berbeda-beda. Selain itu terjadi penundaan separasi sebesar  $25^\circ$  dari  $120^\circ$  pada model *baseline* dan  $150^\circ$  pada model *modified* , dikarenakan penambahan *obstacle* pada *tube* baris yang ditinjau, yaitu dikarenakan peningkatan kecepatan pada celah sempit antara *tube* dan posisi *obstacle tube* baris sebelumnya. Adanya penambahan *obstacle* sangat jelas terlihat pengaruhnya pada *tube* baris kedua, kecepatan lokal *tube* nya jauh lebih tinggi jika dibandingkan dengan tanpa adanya penambahan *obstacle* (model *baseline* ).





Kenaikan kecepatan lokal *tube* setelah adanya penambahan *obstacle* masing-masing baris *tube* tercantum dalam tabel 4.1.



Gambar 4.10 Distribusi Kecepatan Lokal *Tube* Perbandingan Antara Model *Baseline* (tanpa penambahan *obstacle*) dan Model *Modified* (dengan penambahan *obstacle*)

#### 4.3.2 Koefisien Konveksi Lokal *Tube*

Berdasarkan gambar 4.11 mengenai grafik koefisien konveksi lokal *tube* untuk model *baseline* (tanpa adanya penambahan *obstacle*) dapat dilihat bahwa tren grafik koefisien konveksi lokal pada *tube* baris pertama sampai ketiga pada kecepatan inlet 5 m/s, yaitu pada saat  $\theta \cong 0^\circ$  koefisien konveksi lokal *tube* memiliki nilai tertinggi. Hal ini disebabkan adanya pengaruh dari daerah stagnasi (*stagnation point*) pada sudut tersebut saat aliran udara memiliki selisih temperatur yang minimum antara dipermukaan *tube* dan udara disekitar *tube*.

Hal ini dapat dilihat seperti pada persaan 4.1, persamaan 4.2 dan ditinjau juga dari persamaan 2.19, mengenai konveksi *heat transfer* yaitu:



$$q'' = h(T_s - T_\infty) \dots \dots \dots (4.1)$$

$$h = \frac{q''}{T_s - T_\infty} \dots \dots \dots (4.2)$$

$$h = \frac{-k_f \frac{\partial T}{\partial y} \big|_{y=0}}{T_s - T_\infty} \dots \dots \dots (4.19)$$

Dimana :

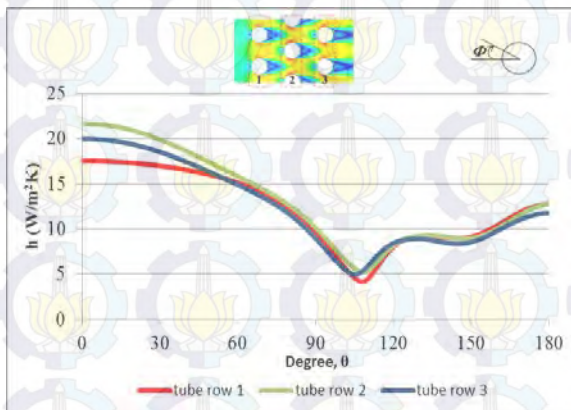
$q''$  = Heat Transfer rate per area

$h$  = Koefisien heat transfer

$T_s$  = Temperatur dipermukaan tube

$T_\infty$  = Temperatur disekitar tube

$k_f$  = Konduktivitas thermal fluida



Gambar 4.11 Distribusi Koefisien Konveksi Lokal Tube Model Baseline (tanpa obstacle)

Setelah aliran melewati  $\theta \cong 0^\circ$  tube, nilai koefisien konveksi lokal tube mengalami penurunan sampai aliran melintasi  $\theta \cong 110^\circ$ . Kemudian koefisien konveksi lokal tube akan mulai mengalami kenaikan pada saat posisi aliran  $\theta \cong 110^\circ$  (terbentuknya vortex). Trend grafik seperti halnya pada tube baris



pertama juga akan terjadi pada trend grafik *tube* pada baris berikutnya. Namun ada perbedaan saat aliran melintasi *tube* baris kedua beberapa derajat dari permukaan *tube*, nilai koefisien konveksi lokal *tube* lebih tinggi dari nilai koefisien lokal *tube* pada baris pertama. Hal ini dikarenakan pada saat aliran fluida akan menumbuk *tube* pada baris kedua, aliran melewati celah sempit. Sesuai dengan sifatnya, saat fluida melewati celah sempit maka kecepatan fluida akan meningkat ( $V_{maks}$ ). Sehingga sesaat sebelum menumbuk *tube* pada baris kedua kecepatan aliran akan menjadi lebih tinggi dimana kecepatan sebanding dengan nilai koefisien konveksi. Selain itu juga ada pengaruh dari temperatur pada *tube* (temperatur konstan) dimana nilai dari tempertur *tube* adalah 347 K. Dalam hal ini pengaruh besar kecilnya nilai dari koefisien konveksi lokal *tube* sangat erat kaitannya terhadap besarnya nilai dari *heat rate per area* ( $q''$ ) yang dipengaruhi oleh selisih temperatur, jika selisih temperatur udara disekitar *tube* dan permukaan *tube* kecil maka nilai *heat rate per area* ( $q''$ ) akan menjadi besar yang sebanding dengan besarnya nilai koefisien konveksi lokal. Oleh karena itu, nilai koefisien konveksi lokal menjadi besar.

#### 4.4 Nusselt Number Lokal Tube

Berdasarkan gambar 4.9 Mengenai grafik Nusselt number lokal *tube* untuk model *baseline* (tanpa penambahan *Obstacle*) dapat dilihat tren grafik Nusselt number lokal pada *tube* baris pertama sampai ketiga pada kecepatan *inlet* 5 m/s, yaitu pada saat  $\theta \cong 0^\circ$  Nusselt number lokal *tube* memiliki nilai tertinggi. Hal ini disebabkan oleh adanya daerah stagnasi (*stagnation point*) pada sudut tersebut saat kecepatan aliran udara memiliki selisih temperatur yang minimum antara dipermukaan *tube* dan udara disekitar *tube*.





Hal ini dapat dilihat seperti pada perumusan 4.3 dan ditinjau dari persamaan 4.2 dan persamaan 2.19.

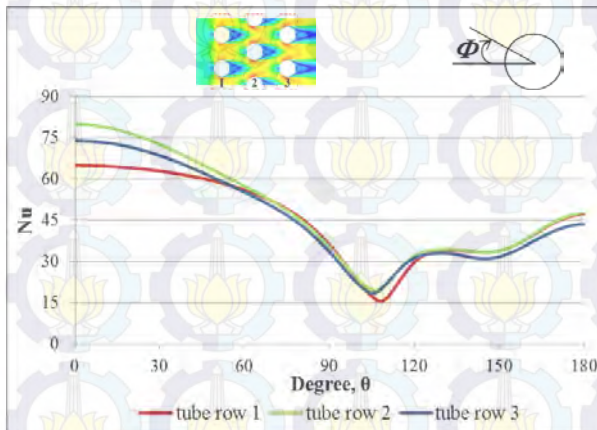
$$Nu = \frac{hD}{k} \dots \dots \dots (4.3)$$

Dimana:

Nu = Nusselt Number

h = Koefisien *heat transfer*

D = Diameter *tube*

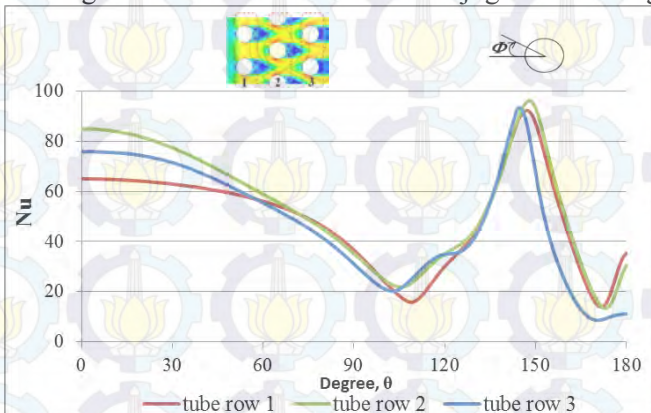


Gambar 4.12 Distribusi Nusselt number Lokal *Tube Model Baseline* (tanpa penambahan *Obstacle*)

Pada trend grafik Nusselt number lokal model *baseline* (tanpa penambahan *obstacle*) sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 4.9. *Tube* pada baris pertama sampai ketiga menunjukkan adanya penurunan Nusselt number lokal saat aliran melintasi *tube* pada posisi aliran  $\theta = 0^\circ$  hingga sudut mencapai  $\theta \cong 110^\circ$ , dimana nilai koefisien konveksinya juga mengalami penurunan dan terjadinya separasi pada nilai nusselt number minimum. Saat posisi aliran saat  $110^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ , kecepatan lokal *tube* mulai mengalami peningkatan, yang diindikasikan dengan peningkatan nilai koefisien konveksi lokal *tube*. Adanya peningkatan tersebut pada model *baseline* ini dikarenakan terbentuknya *vortex* pada daerah tersebut.



Dalam hal ini pengaruh besar kecilnya nilai dari koefisien konveksi lokal *tube* sangat erat kaitannya dengan besarnya nilai *heat rate per area* ( $q''$ ) yang dipengaruhi oleh selisih temperatur, jika selisih temperatur udara sekitar *tube* dan permukaan *tube* kecil maka nilai *heat rate per area* ( $q''$ ) besar sebanding dengan besarnya nilai koefisien konveksi lokal, dimana nilai konveksi lokal meningkat maka nilai Nusselt number juga ikut meningkat.

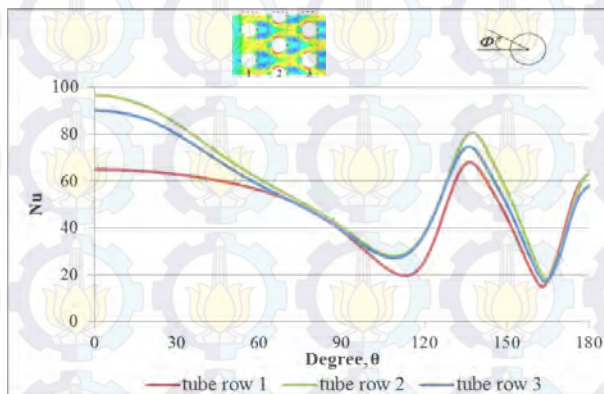


Gambar 4.13 Distribusi Nusselt number Lokal *Tube Model Modified* (dengan posisi sudut *obstacle* sebesar  $150^\circ$ )

Pada trend grafik Nusselt number lokal model *modified* (dengan penambahan *Obstacle*) sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 4.10 Tube pada baris pertama menunjukkan adanya penurunan nilai Nusselt number lokal saat aliran melintasi *tube* seiring dengan bertambahnya sudut  $\theta$ , pada posisi aliran hingga sudut mencapai  $\theta \approx 110^\circ$ . Saat posisi aliran  $111^\circ \leq \theta \leq 147^\circ$ , kecepatan lokal *tube* mulai mengalami peningkatan. Kemudian mengalami penurunan koefisien konveksi lokal *tube* yang signifikan hingga  $\theta \approx 172^\circ$ . Mengalami peningkatan nusselt number lagi hingga  $\theta \approx 180^\circ$ . Pada tube baris kedua saat posisi aliran mencapai  $\theta \approx 106^\circ$  Nusselt number lokal mengalami penurunan yang signifikan namun setelah melewati sudut  $106^\circ$  sesaat Nusselt number lokal mengalami peningkatan hingga  $\theta \approx$



150° kemudian mengalami penurunan Nusselt number lokal yang signifikan hingga  $\theta \cong 175^\circ$ . Nusselt number lokal *tube* mengalami peningkatan kembali hingga  $\theta \cong 180^\circ$ . Pada *tube* baris ketiga nilai Nusselt number lokal akan mengalami penurunan seiring bertambahnya sudut dari *tube*, pada posisi aliran hingga mencapai  $\theta \cong 103^\circ$ . Kemudian saat posisi aliran  $104^\circ \leq \theta \leq 144^\circ$ , kecepatan lokal *tube* mengalami peningkatan. Pada posisi  $145^\circ \leq \theta \leq 169^\circ$  kembali mengalami penurunan nilai Nusselt number. Mengalami peningkatan nusselt number kembali hingga  $\theta \cong 180^\circ$ . Adanya peningkatan pada model *modified* ini dikarenakan terbentuknya *vortex* pada daerah tersebut. Pada grafik menunjukkan adanya kenaikan Nusselt number lokal dikarenakan adanya pengaruh dari penambahan *obstacle* yang mana mempengaruhi performa dari alat *heat exchanger* tersebut.



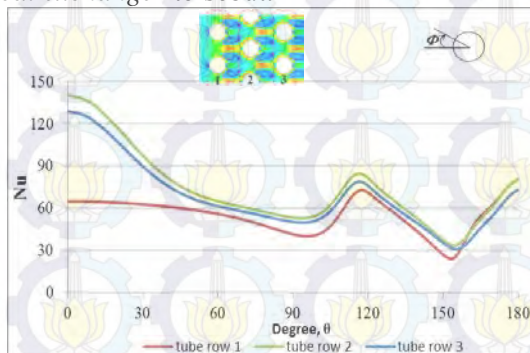
Gambar 4.14 Distribusi Nusselt number Lokal Tube Model *Modified* (dengan posisi sudut *obstacle* sebesar 135°)

Pada trend grafik Nusselt number lokal model *modified* (dengan penambahan *Obstacle*) sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 4.11 Tube pada baris pertama menunjukkan adanya penurunan nilai Nusselt number lokal saat aliran melintasi *tube* seiring dengan bertambahnya sudut  $\theta$ , pada posisi aliran hingga





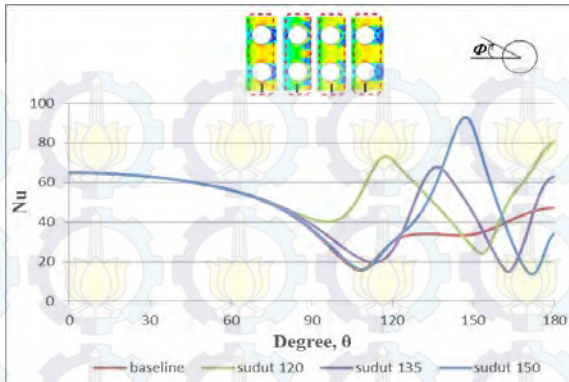
sudut mencapai  $\theta \cong 117^\circ$ . Saat posisi aliran  $118^\circ \leq \theta \leq 136^\circ$ , kecepatan lokal *tube* mulai mengalami peningkatan. Kemudian mengalami penurunan koefisien konveksi lokal tube yang signifikan hingga  $\theta \cong 163^\circ$ . Mengalami peningkatan nusselt number lagi hingga  $\theta \cong 180^\circ$ . Pada *tube* baris kedua saat posisi aliran mencapai  $\theta \cong 108^\circ$  Nusselt number lokal mengalami penurunan yang signifikan namun setelah melewati sudut  $108^\circ$  sesaat Nusselt number lokal mengalami peningkatan hingga  $\theta \cong 137^\circ$  kemudian mengalami penurunan Nusselt number lokal yang signifikan hingga  $\theta \cong 164^\circ$ . Nusselt number lokal tube mengalami peningkatan kembali hingga  $\theta \cong 180^\circ$ . Pada *tube* baris ketiga nilai Nusselt number lokal akan mengalami penurunan seiring bertambahnya sudut dari *tube*, pada posisi aliran hingga mencapai  $\theta \cong 108^\circ$ . Kemudian saat posisi aliran  $109^\circ \leq \theta \leq 136^\circ$ , kecepatan lokal tube mengalami peningkatan. Pada posisi  $137^\circ \leq \theta \leq 164^\circ$  kembali mengalami penurunan nilai Nusselt number. Mengalami peningkatan nusselt number kembali hingga  $\theta \cong 180^\circ$ . Adanya peningkatan pada model *modified* ini dikarenakan terbentuknya *vortex* pada daerah tersebut. Pada grafik menunjukkan adanya kenaikan Nusselt number lokal dikarenakan adanya pengaruh dari penambahan *obstacle* yang mana mempengaruhi performa dari alat *heat exchanger* tersebut.



Gambar 4.15 Distribusi Nusselt number Lokal Tube Model *Modified* (dengan posisi sudut *obstacle* sebesar  $120^\circ$ )



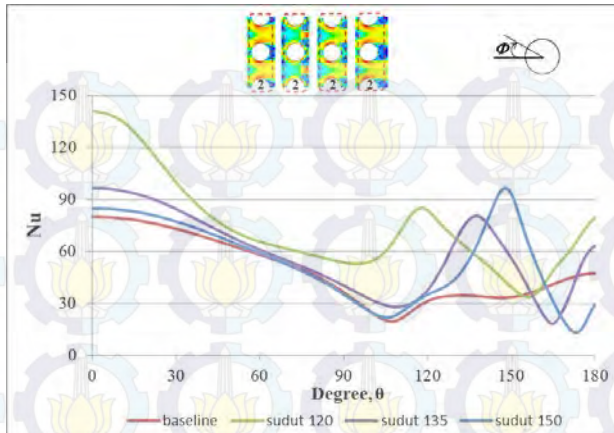
Pada trend grafik Nusselt number lokal model *modified* (dengan penambahan *Obstacle*) sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 4.12 *Tube* pada baris pertama menunjukkan adanya penurunan nilai Nusselt number lokal saat aliran melintasi *tube* seiring dengan bertambahnya sudut  $\theta$ , pada posisi aliran hingga sudut mencapai  $\theta \cong 95^\circ$ . Saat posisi aliran  $96^\circ \leq \theta \leq 118^\circ$ , kecepatan lokal *tube* mulai mengalami peningkatan. Kemudian mengalami penurunan koefisien konveksi lokal *tube* yang signifikan hingga  $\theta \cong 154^\circ$ . Mengalami peningkatan nusselt number lagi hingga  $\theta \cong 180^\circ$ . Pada *tube* baris kedua saat posisi aliran mencapai  $\theta \cong 94^\circ$  Nusselt number lokal mengalami penurunan yang signifikan namun setelah melewati sudut  $95^\circ$  sesaat Nusselt number lokal mengalami peningkatan hingga  $\theta \cong 118^\circ$  kemudian mengalami penurunan Nusselt number lokal yang signifikan hingga  $\theta \cong 156^\circ$  Nusselt number lokal *tube* mengalami peningkatan kembali hingga  $\theta \cong 180^\circ$ . Pada *tube* baris ketiga nilai Nusselt number lokal akan mengalami penurunan seiring bertambahnya sudut dari *tube*, pada posisi aliran hingga mencapai  $\theta \cong 93^\circ$ . Kemudian saat posisi aliran  $94^\circ \leq \theta \leq 116^\circ$ , kecepatan lokal *tube* mengalami peningkatan. Pada posisi  $117^\circ \leq \theta \leq 144^\circ$  kembali mengalami penurunan nilai Nusselt number. Mengalami peningkatan nusselt number kembali hingga  $\theta \cong 168^\circ$  dan mengalami penurunan hingga  $\theta \cong 180^\circ$ . Adanya peningkatan pada model *modified* ini dikarenakan terbentuknya vortex pada daerah tersebut. Pada grafik menunjukkan adanya kenaikan Nusselt number lokal dikarenakan adanya pengaruh dari penambahan *obstacle* yang mana mempengaruhi performa dari alat *heat exchanger* tersebut.



Gambar 4.16 Perbandingan Distribusi Nusselt number lokal *tube* model *Modified* dengan *baseline* terhadap *tube* row 1

Berdasarkan gambar 4.13 Dapat dilihat bahwa Nilai nusselt number lokal pada *tube* baris pertama memiliki nilai yang sama pada model *baseline* (tanpa penambahan *obstacle*) dan model *modified* (penambahan *obstacle*) pada posisi sudut *obstacle* sebesar 150°, 135° dan 120°. Memiliki nilai Nusselt number lokal *tube* yang sama dikarenakan pada model *modified* untuk daerah ini belum ada pengaruh dari penambahan *obstacle*. Beberapa derajat setelah melintasi permukaan *tube* nilai Nusselt number akan mengalami penurunan dan terjadi peningkatan nilai Nusselt number akibat pengaruh dari *obstacle*. Karena pengaruh dari aliran yang memasuki celah sempit antara *tube* dengan *obstacle* sesaat kecepatan aliran akan meningkat sampai mencapai kecepatan maksimal. Setelah melewati celah sempit antara *obstacle* dan *tube* nilai Nusselt number akan mengalami penurunan beberapa derajat dikarenakan sebagian aliran akan menuju *tube* row berikutnya dan sebagian lagi berolak (membentuk *vortex*) dibagian belakang *tube* dan *obstacle* tidak langsung mengalir menuju *tube* berikutnya.



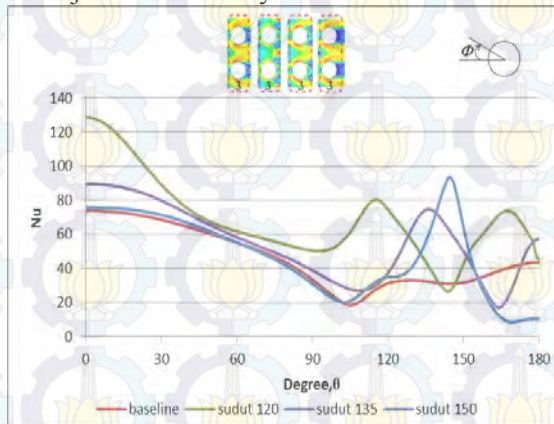


Gambar 4.17 Perbandingan Distribusi Nusselt number lokal tube model *Modified* dengan *baseline* terhadap tube row 2

Berdasarkan gambar 4.14 Dapat dilihat bahwa Nilai nusselt number lokal pada tube baris kedua memiliki nilai yang berbeda-beda pada model *baseline* (tanpa penambahan *obstacle*) dan model *modified* (penambahan *obstacle*) pada posisi sudut *obstacle* sebesar  $150^\circ$ ,  $135^\circ$  dan  $120^\circ$ . Memiliki nilai Nusselt number lokal tube yang berbeda dikarenakan pada model *modified* untuk daerah ini akan tergantung pada celah sempit yang dihasilkan oleh posisi sudut *obstacle* yang berbeda-beda, semakin besar posisi sudut *obstacle* maka celah antar *obstacle* yang dihasilkan akan semakin sempit sehingga kecepatan aliran yang dihasilkan akan lebih meningkat. Hal ini sesuai dengan karakteristik fluida, apabila fluida yang melewati celah yang lebih sempit maka kecepatan dan tekanannya akan meningkat. Beberapa derajat setelah melintasi permukaan tube nilai Nusselt number akan mengalami penurunan dan terjadi peningkatan nilai Nusselt number akibat pengaruh dari obstacle. Karena pengaruh dari aliran yang memasuki celah sempit antara tube dengan obstacle sesaat kecepatan aliran akan meningkat sampai mencapai kecepatan maksimal. Setelah melewati celah sempit antara obstacle dan tube nilai Nusselt number akan mengalami



penurunan beberapa derajat dikarenakan sebagian aliran akan menuju *tube row* berikutnya dan sebagian lagi berolak (membentuk *vortex*) dibagian belakang *tube* dan *obstacle* tidak langsung mengalir menuju *tube* berikutnya.



Gambar 4.18 Perbandingan Distribusi Nusselt number lokal *tube* model *Modified* dengan *baseline* terhadap *tube row* 3

Berdasarkan gambar 4. Dapat dilihat bahwa Nilai nusselt number lokal pada *tube* baris ketiga memiliki nilai yang berbeda-beda pada model *baseline* (tanpa penambahan *obstacle*) dan model *modified* (penambahan *obstacle*) pada posisi sudut *obstacle* sebesar 150°, 135° dan 120°. Memiliki nilai Nusselt number lokal *tube* yang berbeda dikarenakan pada model *modified* untuk daerah ini akan tergantung pada celah sempit yang dihasilkan oleh posisi sudut *obstacle* yang berbeda-beda, semakin besar posisi sudut *obstacle* maka celah antar *obstacle* yang dihasilkan akan semakin sempit sehingga kecepatan aliran yang dihasilkan akan lebih meningkat. Hal ini sesuai dengan karakteristik fluida, apabila fluida yang melewati celah yang lebih sempit maka kecepatan dan tekanannya akan meningkat. Beberapa derajat setelah melintasi permukaan *tube* nilai Nusselt number akan mengalami penurunan dan terjadi peningkatan nilai Nusselt number akibat pengaruh dari *obstacle*. Karena pengaruh dari aliran yang memasuki celah

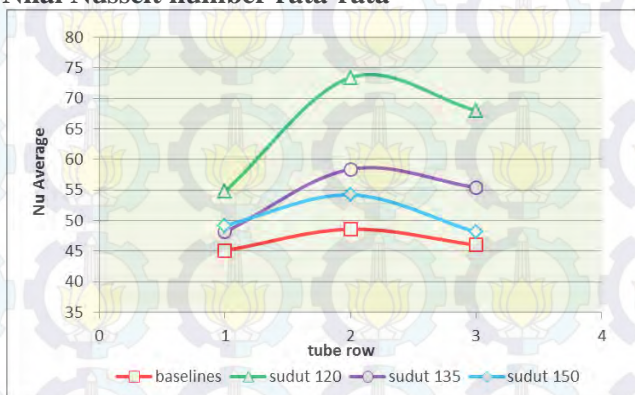


sempit antara *tube* dengan *obstacle* sesaat kecepatan aliran akan meningkat sampai mencapai kecepatan maksimal. Setelah melewati celah sempit antara *obstacle* dan *tube* nilai Nusselt number akan mengalami penurunan beberapa derajat dikarenakan sebagian aliran akan meju *tube row* berikutnya dan sebagian lagi berolak (membentuk *vortex*) dibagian belakang *tube* dan *obstacle* tidak langsung mengalir menuju *tube* berikutnya.

Tabel 4.1 Kisaran Kenaikkan Nusselt number Lokal *Tube* Akibat Adanya Penambahan *Obstacle*

	Tube pada baris ke-		
	1	2	3
sudut 120°	21,4%	51,2%	48,2%
sudut 135°	6,6%	20,3%	20,9%
sudut 150°	9,2%	12%	5,4%

#### 4.4.1 Nilai Nusselt number rata-rata



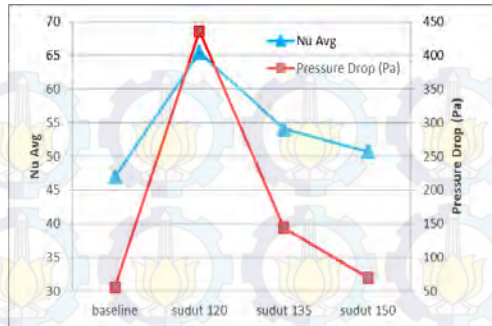
Gambar 4.19 Nusselt number rata-rata lokal *tube*





Berdasarkan gambar 4.16 D dapat dilihat bahwa nilai Nusselt number rata-rata pada model *baseline* dan model *modified* (adanya penambahan *obstacle*) setiap *row* memiliki nilai yang berbeda. Nilai nusselt number rata-rata yang diperoleh pada tube *row* 1 mengalami peningkatan dikarenakan pengaruh dari posisi sudut *obstacle*. Pada model *baseline* nilai nusselt rata-rata mempunyai nilai terendah. Pengaruh dari variasi posisi sudut *obstacle* yang berbentuk rectangular pada kemiringan  $150^\circ$ ,  $135^\circ$  dan  $120^\circ$  berdasarkan titik pusat *tube* yang diukur dari *stagnation point*, akan menghasilkan celah antara posisi *obstacle tube* 1 dan pada *tube* 2. Semakin sempit celah yang dihasilkan maka posisi sudut *obstacle* akan lebih besar. Hal ini sesuai dengan karakteristik fluida ketika melewati celah sempit. Nilai Nusselt number rata-rata akan mengalami peningkatan pada tube *row* kedua dan terjadi penurunan akibat kehilangan momentum dari aliran fluida pada *tube row* ketiga.

Berdasarkan gambar 4.17 dapat dilihat bahwa nilai Nusselt number rata-rata dan *Pressure Drop* pada model *baseline* (tanpa adanya penambahan *obstacle*) dan *modified* (dengan adanya penambahan *obstacle*) memiliki trend grafik yang semakin meningkat seiring dengan perubahan posisi sudut dari *obstacle* ( $150^\circ$ ,  $135^\circ$  dan  $120^\circ$ ). Dapat disimpulkan bahwa semakin kecil posisi sudut *obstacle* (berdasarkan titik pusat *tube* yang diukur dari *stagnation point*) maka semakin besar nilai Nusselt number rata-rata dan *Pressure Drop*-nya. Diharapkan dengan adanya penambahan *obstacle* proses perpindahan panasnya menjadi lebih baik akan tetapi nilai *pressure drop* nya tidak besar.

Gambar 4.20 Nusselt number Rata-rata dan *Pressure Drop*Tabel 4.2 Kisaran Kenaikan Nilai Nusselt number Rata-rata lokal  
*Tube Model Modified* (Adanya Penambahan *Obstacle*)

Posisi <i>Obstacle</i>		
sudut 120	sudut 135	sudut 150
40,6%	16,1%	8,9%



*Halaman ini sengaja dikosongkan*





## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan uraian yang telah disampaikan pada hasil dan pembahasan diatas, maka dapat disimpulkan mengenai pengaruh posisi sudut obstacle terhadap karakteristik aliran fluida dan perpindahan panas melewati tube banks yang disusun secara staggered untuk studi kasus posisi sudut obstacle berbentuk rectangular pada kemiringan  $120^\circ$ ,  $135^\circ$  dan  $120^\circ$ , diantaranya :

1. Distribusi temperatur pada model baseline lebih rendah dengan indikasi temperatur outlet yang lebih rendah dibandingkan dengan model modified dengan adanya penambahan obstacle.
2. Nilai Nusselt number rata-rata yang dihasilkan dari model modified dengan adanya penambahan obstacle meningkat yakni besar peningkatannya berkisar antara 8,9–40,6% lebih tinggi dari pada nilai Nusselt number rata-rata pada model baseline.
3. Perpindahan panas yang terjadi pada model modified dengan adanya penambahan obstacle lebih baik jika dibandingkan dengan model baseline. Dilihat dari kenaikan nilai Nusselt number dan didukung dengan visualisasi kontur kecepatan dan temperatur.
4. Dengan adanya penambahan obstacle, maka pressure drop akan mengalami peningkatan sebesar 25-678,5 % lebih tinggi dari model baseline
5. Dilihat dari nilai Nusselt number rata-rata dan pressure drop, model modified dengan posisi kemiringan obstacle pada kemiringan  $120^\circ$  menghasilkan performa yang lebih baik daripada kedua model yang lainnya.



## 5.2. Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan setelah penelitian dan diharapkan dapat dimanfaatkan sebagai pertimbangan dalam penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Pada studi secara numerik diharapkan memperhatikan kualitas dalam pemodelan pada gambit agar didapatkan karakteristik aliran yang baik selain itu waktu iterasi yang lebih cepat dan memory file yang digunakan lebih sedikit.
2. Pada saat iterasi tidak mencapai konvergen, sebaiknya dilakukan pembenahan pada bentuk dan kerapatan grid terutama disekitar solid surface agar mendapatkan hasil yang lebih baik.
3. Perlu dilakukan modifikasi bentuk yang lain dari obstacle, jarak obstacle dengan tube, posisi sudut kemiringan obstacle, peletakkan tube dibagian yang berbeda dan lain sebagainya.
4. Perlu dilakukan modifikasi dalam penentuan boundary condition inlet dan outlet pada software fluent untuk mendapatkan hasil penelitian yang mendekati kondisi yang sebenarnya.



---

**DAFTAR PUSTAKA**

Chu, Pan., He, Ya-Ling., Tao, Wen-Quan., (2019). *Three-Dimensional Numerical Study of Flow and Heat Transfer Enhancement Using Vortex Generators in Fin-and-Tube Heat Exchangers*". Journal of Heat Transfer ASME Vol 131, 1-9.

CV. Prima Utama (2012). *Coil Heat Exchanger*[http, <URL:http://heatexchangerindonesia.com>](http://heatexchangerindonesia.com)

Danille Chasnoff (2010). *Air Conditioner Manufacturer Portable*, <URL:<http://air-conditioner-news.blogspot.com>>

Fox, Robert W. dan Mc. Donald, Alan T. (2011) "*Introduction to Fluid Mechanics*", Edisi Kedelapan, John Wiley & Sons, Inc, Singapore.

Gupta Munish (2010) "*Numerical Study of Heat Transfer Enhancement in a Plate-Fin Heat Exchanger Using Rectangular Winglet Type Vortex Generator*". Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology, India.

Incropera, Frank P. and DeWitt, David P. (2007) "*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*", Edisi Kelima, John Wiley & Sons, Inc, Singapore.

Jang, Jiin-Yuh., Hsu, Ling-Fang., Leu, Jin-Sheng., (2013) "*Optimization of the Span Angle and Location of Vortex Generators in a Plate-Fin and Tube Heat Exchnager*". International Journal of Heat and Mass Transfer 67, 432-444.

Kannan, K.Thirumalai dan Kumar, B.Senthil. (2011) "*Heat Transfer and Fluid Flow Analysis in Plate-Fin and Tube Heat Exchangers with Different Shaped Vortex Generators*". International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE) 2, 2231-2307.





Khan, W.A., Culham, J.R., Yovanovic, M.M, (2006). *“Convection heat transfer from tube banks in crossflow: Analytical approach”*. International Journal of Heat and Mass Transfer 49, 1-8

Kristianto, Oktavianus, Danny. (2013) *“Studi Numerik Pengaruh Convergency Promoters (CPs) terhadap Karakteristik Aliran dan Perpindahan Panas dengan  $\ell/D = 0.15$ , pada Tube Banks yang Tersusun Secara Staggered”*. Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS, Surabaya.

Lei, Yong-Gang., He, Ya-Ling., Tian, Li-Ting., Chu, Pan., Tao, Wen-Quan., (2010) *“Hydrodynamics and Heat Transfer Characteristics of a Novel Heat Exchanger with Delta-Winglet Vortex Generators”*. Chemical Engineering Science 65, 1551-1562.

Mas Syukur (2013). *Sparepart AC Split*,  
<URL:<http://mhasanb.blogspot.com>>

Rachman (2014). *Kondensor Sebelum dan Sesudah Dibersihkan*,  
<URL: <http://service-ac-pondok-gede.blogspot.com>>



## **RIWAYAT PENULIS**



Penulis dilahirkan di Palembang, 3 Mei 1990, merupakan anak ke-2 dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di TK Aisyah (1995-1996), SDN 127 Palembang (1996 - 2002), SMPN 17 Palembang (2002 - 2005), SMAN 2 Palembang (2005 - 2008) dan D3 Teknik Mesin FTI-ITS (2008 - 2011). Setelah lulus dari program studi D3 yaitu tahun 2011, penulis melanjutkan studi ke tahap sarjana melalui program Lintas Jalur di Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Dan

diterima pada bulan Januari tahun 2012 dengan NRP 2111106035 dan menyelesaikan pada bulan Juli 2014. Penulis memiliki hobi futsal, berenang dan menonton film. Keinginan untuk selalu belajar dan mengamalkan ilmu yang didapat selama kuliah mendorong penulis untuk mengambil Tugas Akhir dengan judul “Studi Numerik Pengaruh Posisi Sudut *Obstacle* Berbentuk *Rectangular* Terhadap Karakteristik Aliran Dan Perpindahan Panas Pada *Tube Banks* Tersusun Secara *Staggered*”. Penulis memiliki harapan agar ilmu yang telah didapatkan dapat berguna untuk agama dan negara. Penulis dapat dihubungi melalui email dibawah ini.

[rizki\\_anggiansyah@yahoo.com](mailto:rizki_anggiansyah@yahoo.com)

[rizkianggiansyah35@gmail.com](mailto:rizkianggiansyah35@gmail.com)



*halaman ini sengaja dikosongkan*





## LAMPIRAN

➤ Grid independency

Model *Modified* (dengan adanya penambahan *obstacle*) posisi sudut  $120^\circ$

Jenis Meshing	Jumlah Elemen (cells)	Nilai Nu Avg
Meshing A	42484	74,95
Meshing B	62016	75,74
<b>Meshing C</b>	<b>108576</b>	<b>65,47</b>
Meshing D	125904	65,25

Model *Modified* (dengan adanya penambahan *obstacle*) posisi sudut  $135^\circ$

Jenis Meshing	Jumlah Elemen (cells)	Nilai Nu Avg
Meshing A	42484	63,71
Meshing B	62016	65,00
<b>Meshing C</b>	<b>108576</b>	<b>54,06</b>
Meshing D	125904	54,00

Model *Modified* (dengan adanya penambahan *obstacle*) posisi sudut  $150^\circ$

Jenis Meshing	Jumlah Elemen (cells)	Nilai Nu Avg
Meshing A	42484	57,32
Meshing B	62016	57,77
<b>Meshing C</b>	<b>108576</b>	<b>50,71</b>
Meshing D	125904	50,82



Data Nilai Nu Baseline

tube row 1		tube row 2		tube row 3	
Degree 0	Nu	Degree 0	Nu	Degree 0	Nu
0	64.93	0	79.91	0	73.88
1	64.93	1	79.91	1	73.86
2	64.93	2	79.88	2	73.85
3	64.92	3	79.86	3	73.82
5	64.89	5	79.82	5	73.74
6	64.86	6	79.71	6	73.66
7	64.83	7	79.57	7	73.57
8	64.79	8	79.43	8	73.46
9	64.76	9	79.27	9	73.34
10	64.70	10	79.09	10	73.22
12	64.63	12	78.89	12	73.07
13	64.56	13	78.67	13	72.93
14	64.48	14	78.45	14	72.75
15	64.40	15	78.20	15	72.53
16	64.32	16	77.90	16	72.30
17	64.23	17	77.57	17	72.06
19	64.13	19	77.22	19	71.80
20	64.03	20	76.86	20	71.53
21	63.92	21	76.49	21	71.25
22	63.81	22	76.10	22	70.95
23	63.69	23	75.70	23	70.64
24	63.57	24	75.28	24	70.31
26	63.44	26	74.84	26	69.96
27	63.31	27	74.39	27	69.60
28	63.17	28	73.92	28	69.23
29	63.01	29	73.45	29	68.84
30	62.85	30	72.95	30	68.45
31	62.69	31	72.46	31	68.04
33	62.51	33	71.96	33	67.62
34	62.33	34	71.44	34	67.18
35	62.15	35	70.90	35	66.72
36	61.95	36	70.34	36	66.24
37	61.75	37	69.78	37	65.76
38	61.54	38	69.21	38	65.27
39	61.33	39	68.63	39	64.77
41	61.10	41	68.05	41	64.26
42	60.87	42	67.47	42	63.76
43	60.63	43	66.89	43	63.25
44	60.40	44	66.30	44	62.73
45	60.15	45	65.71	45	62.19
46	59.90	46	65.10	46	61.65
48	59.63	48	64.49	48	61.10
49	59.35	49	63.88	49	60.55
50	59.05	50	63.27	50	60.00
51	58.75	51	62.66	51	59.45
52	58.43	52	62.04	52	58.89
53	58.10	53	61.43	53	58.33
55	57.76	55	60.82	55	57.77
56	57.41	56	60.21	56	57.20
57	57.04	57	59.60	57	56.61
58	56.66	58	59.00	58	56.08
59	56.27	59	58.39	59	55.52
60	55.88	60	57.78	60	54.94
62	55.44	62	57.16	62	54.36
63	55.00	63	56.54	63	53.77
64	54.55	64	55.91	64	53.17
65	54.07	65	55.28	65	52.56
66	53.57	66	54.63	66	51.94
67	53.05	67	53.98	67	51.31
69	52.50	69	53.31	69	50.66
70	51.93	70	52.63	70	50.00
71	51.33	71	51.94	71	49.33
72	50.71	72	51.24	72	48.63
73	50.05	73	50.52	73	47.91
74	49.37	74	49.77	74	47.16
75	48.66	75	49.00	75	46.39
77	47.91	77	48.20	77	45.58
78	47.12	78	47.37	78	44.74
79	46.28	79	46.52	79	43.86

Data Kecepatan Baseline

tube row 1		tube row 2		tube row 3	
Degree 0	V (m/s)	Degree 0	V (m/s)	Degree 0	V (m/s)
0	0	0	0	0	0.05
1	0.1	1	0.06	1	0.16
2	0.16	2	0.17	2	0.26
3	0.23	3	0.28	3	0.36
5	0.29	5	0.39	5	0.46
6	0.36	6	0.51	6	0.56
7	0.42	7	0.62	7	0.65
8	0.49	8	0.72	8	0.75
9	0.55	9	0.83	9	0.85
10	0.61	10	0.94	10	0.94
12	0.68	12	1.04	12	1.04
13	0.74	13	1.14	13	1.13
14	0.8	14	1.24	14	1.22
15	0.86	15	1.34	15	1.31
16	0.92	16	1.43	16	1.4
17	0.98	17	1.52	17	1.48
19	1.04	19	1.61	19	1.56
20	1.1	20	1.69	20	1.64
21	1.16	21	1.77	21	1.72
22	1.21	22	1.85	22	1.79
23	1.27	23	1.93	23	1.86
24	1.32	24	2	24	1.93
26	1.38	26	2.06	26	1.99
27	1.43	27	2.13	27	2.03
28	1.48	28	2.19	28	2.11
29	1.53	29	2.24	29	2.17
30	1.58	30	2.29	30	2.22
31	1.63	31	2.34	31	2.27
33	1.68	33	2.39	33	2.31
34	1.73	34	2.43	34	2.35
35	1.77	35	2.47	35	2.39
36	1.81	36	2.5	36	2.42
37	1.86	37	2.53	37	2.45
38	1.9	38	2.55	38	2.48
39	1.94	39	2.57	39	2.5
41	1.97	41	2.59	41	2.52
42	2.01	42	2.61	42	2.54
43	2.04	43	2.62	43	2.55
44	2.07	44	2.63	44	2.56
45	2.11	45	2.64	45	2.57
46	2.14	46	2.64	46	2.57
48	2.16	48	2.64	48	2.58
49	2.19	49	2.64	49	2.57
50	2.21	50	2.63	50	2.57
51	2.23	51	2.62	51	2.56
52	2.25	52	2.61	52	2.55
53	2.27	53	2.6	53	2.54
55	2.28	55	2.58	55	2.52
56	2.29	56	2.56	56	2.51
57	2.3	57	2.54	57	2.49
58	2.3	58	2.52	58	2.47
59	2.31	59	2.5	59	2.44
60	2.31	60	2.47	60	2.42
62	2.31	62	2.44	62	2.39
63	2.3	63	2.41	63	2.36
64	2.29	64	2.38	64	2.32
65	2.28	65	2.34	65	2.29
66	2.26	66	2.3	66	2.25
67	2.24	67	2.26	67	2.2
69	2.22	69	2.22	69	2.16
70	2.19	70	2.17	70	2.11
71	2.16	71	2.12	71	2.06
72	2.12	72	2.07	72	2
73	2.08	73	2.02	73	1.95
74	2.04	74	1.96	74	1.88
75	1.99	75	1.9	75	1.82
77	1.93	77	1.83	77	1.75
78	1.87	78	1.76	78	1.67
79	1.81	79	1.69	79	1.59



80	45,40	80	45,62	80	42,95
81	44,48	81	44,69	81	41,98
82	43,51	82	43,72	82	40,98
84	42,49	84	42,71	84	39,94
85	41,41	85	41,66	85	38,84
86	40,28	86	40,56	86	37,69
87	39,09	87	39,41	87	36,50
88	37,84	88	38,22	88	35,26
89	36,54	89	36,99	89	33,97
91	35,18	91	35,71	91	32,66
92	33,76	92	34,40	92	31,30
93	32,30	93	33,05	93	29,92
94	30,80	94	31,67	94	28,53
95	29,26	95	30,29	95	27,14
96	27,71	96	28,89	96	25,76
98	26,15	98	27,51	98	24,41
99	24,61	99	26,15	99	23,13
100	23,08	100	24,84	100	21,89
101	21,60	101	23,59	101	20,74
102	20,18	102	22,39	102	19,82
103	18,82	103	21,33	103	19,05
105	17,62	105	20,49	105	18,82
106	16,60	106	19,81	106	18,44
107	15,79	107	19,44	107	18,87
108	15,48	108	19,51	108	19,74
109	15,85	109	20,08	109	20,86
110	16,83	110	21,05	110	22,14
111	18,22	111	22,23	111	23,80
113	19,87	113	23,54	113	24,86
114	21,61	114	24,92	114	26,19
115	23,35	115	26,27	115	27,43
116	25,05	116	27,59	116	28,53
117	26,64	117	28,82	117	29,52
118	28,09	118	29,93	118	30,38
120	29,39	120	30,89	120	31,08
121	30,52	121	31,75	121	31,63
122	31,47	122	32,47	122	32,04
123	32,22	123	33,03	123	32,35
124	32,80	124	33,46	124	32,57
125	33,23	125	33,77	125	32,74
127	33,55	127	34,01	127	32,86
128	33,77	128	34,18	128	32,95
129	33,92	129	34,31	129	33,00
130	34,02	130	34,39	130	32,99
131	34,08	131	34,46	131	32,93
132	34,11	132	34,49	132	32,83
134	34,09	134	34,48	134	32,70
135	34,06	135	34,43	135	32,53
136	34,02	136	34,34	136	32,31
137	33,94	137	34,23	137	32,07
138	33,84	138	34,09	138	31,83
139	33,72	139	33,92	139	31,59
141	33,59	141	33,74	141	31,38
142	33,48	142	33,56	142	31,20
143	33,38	143	33,40	143	31,06
144	33,31	144	33,27	144	30,99
145	33,29	145	33,18	145	30,98
146	33,32	146	33,15	146	31,04
147	33,42	147	33,18	147	31,17
149	33,58	149	33,29	149	31,38
150	33,81	150	33,46	150	31,65
151	34,10	151	33,71	151	31,99
152	34,47	152	34,04	152	32,38
153	34,90	153	34,43	153	32,84
154	35,40	154	34,89	154	33,34
156	35,95	156	35,42	156	33,89
157	36,56	157	36,01	157	34,48
158	37,21	158	36,65	158	35,10
159	37,90	159	37,33	159	35,73
160	38,60	160	38,04	160	36,38
161	39,32	161	38,78	161	37,02
163	40,05	163	39,52	163	37,67
164	40,79	164	40,28	164	38,31

80	1,74	80	1,61	80	1,51
81	1,66	81	1,53	81	1,42
82	1,58	82	1,44	82	1,33
84	1,49	84	1,35	84	1,23
85	1,4	85	1,26	85	1,13
86	1,3	86	1,16	86	1,03
87	1,2	87	1,06	87	0,92
88	1,1	88	0,96	88	0,82
89	0,99	89	0,86	89	0,71
91	0,88	91	0,75	91	0,6
92	0,77	92	0,65	92	0,5
93	0,66	93	0,54	93	0,39
94	0,55	94	0,44	94	0,29
95	0,44	95	0,34	95	0,2
96	0,34	96	0,25	96	0,11
98	0,25	98	0,16	98	0,04
99	0,16	99	0,08	99	-0,05
100	0,08	100	0,02	100	-0,11
101	0,02	101	-0,07	101	-0,17
102	-0,06	102	-0,13	102	-0,23
103	-0,11	103	-0,19	103	-0,27
105	-0,16	105	-0,25	105	-0,32
106	-0,2	106	-0,29	106	-0,36
107	-0,24	107	-0,34	107	-0,4
108	-0,27	108	-0,38	108	-0,44
109	-0,31	109	-0,42	109	-0,48
110	-0,34	110	-0,46	110	-0,52
111	-0,38	111	-0,5	111	-0,55
113	-0,42	113	-0,54	113	-0,58
114	-0,46	114	-0,57	114	-0,61
115	-0,5	115	-0,6	115	-0,63
116	-0,53	116	-0,63	116	-0,65
117	-0,56	117	-0,66	117	-0,66
118	-0,59	118	-0,68	118	-0,67
120	-0,62	120	-0,69	120	-0,68
121	-0,64	121	-0,7	121	-0,68
122	-0,65	122	-0,71	122	-0,67
123	-0,66	123	-0,7	123	-0,66
124	-0,65	124	-0,7	124	-0,65
125	-0,65	125	-0,69	125	-0,64
127	-0,64	127	-0,68	127	-0,63
128	-0,63	128	-0,67	128	-0,62
129	-0,62	129	-0,66	129	-0,61
130	-0,61	130	-0,65	130	-0,6
131	-0,6	131	-0,63	131	-0,59
132	-0,59	132	-0,62	132	-0,57
134	-0,58	134	-0,61	134	-0,56
135	-0,56	135	-0,6	135	-0,54
136	-0,55	136	-0,58	136	-0,52
137	-0,54	137	-0,57	137	-0,5
138	-0,52	138	-0,55	138	-0,48
139	-0,51	139	-0,54	139	-0,47
141	-0,49	141	-0,52	141	-0,45
142	-0,48	142	-0,5	142	-0,43
143	-0,46	143	-0,48	143	-0,42
144	-0,45	144	-0,47	144	-0,4
145	-0,44	145	-0,45	145	-0,39
146	-0,43	146	-0,44	146	-0,38
147	-0,42	147	-0,43	147	-0,38
149	-0,41	149	-0,42	149	-0,37
150	-0,4	150	-0,41	150	-0,37
151	-0,4	151	-0,41	151	-0,37
152	-0,4	152	-0,4	152	-0,36
153	-0,39	153	-0,4	153	-0,36
154	-0,39	154	-0,4	154	-0,36
156	-0,39	156	-0,4	156	-0,37
157	-0,39	157	-0,4	157	-0,37
158	-0,39	158	-0,4	158	-0,37
159	-0,39	159	-0,4	159	-0,36
160	-0,39	160	-0,4	160	-0,36
161	-0,39	161	-0,4	161	-0,36
163	-0,38	163	-0,4	163	-0,35
164	-0,37	164	-0,4	164	-0,35





165	41.52	165	41.04	165	38.93
166	42.23	166	41.79	166	39.54
167	42.92	167	42.52	167	40.11
168	43.57	168	43.22	168	40.65
170	44.17	170	43.88	170	41.15
171	44.74	171	44.50	171	41.62
172	45.27	172	45.08	172	42.04
173	45.73	173	45.61	173	42.42
174	46.14	174	46.09	174	42.75
175	46.48	175	46.50	175	43.02
177	46.76	177	46.84	177	43.25
178	46.97	178	47.13	178	43.41
179	47.11	179	47.34	179	43.53
180	47.18	180	47.48	180	43.57

165	-0.37	165	-0.39	165	-0.34
166	-0.35	166	-0.38	166	-0.32
167	-0.34	167	-0.37	167	-0.31
168	-0.32	168	-0.35	168	-0.29
170	-0.3	170	-0.34	170	-0.27
171	-0.28	171	-0.32	171	-0.25
172	-0.25	172	-0.29	172	-0.23
173	-0.23	173	-0.27	173	-0.2
174	-0.2	174	-0.24	174	-0.17
175	-0.16	175	-0.2	175	-0.15
177	-0.13	177	-0.17	177	-0.11
178	-0.09	178	-0.13	178	-0.08
179	-0.06	179	-0.1	179	-0.05
180	-0.02	180	-0.06	180	-0.02

Data Nilai Nu Sudut 120°

tube row 1		tube row 2		tube row 3	
Degree 0	Nu	Degree 0	Nu	Degree 0	Nu
0	64.93	0	140.76	0	129.24
1	64.93	1	140.14	1	128.66
2	64.93	2	139.83	2	128.37
3	64.92	3	139.43	3	127.97
5	64.89	5	138.84	5	127.41
6	64.86	6	138.13	6	126.73
7	64.83	7	137.32	7	125.91
8	64.79	8	136.27	8	124.94
9	64.76	9	135.14	9	123.76
10	64.70	10	133.61	10	122.29
12	64.63	12	131.84	12	120.68
13	64.55	13	130.01	13	119.02
14	64.48	14	128.12	14	117.31
15	64.40	15	126.16	15	115.52
16	64.31	16	124.11	16	113.65
17	64.22	17	121.97	17	111.71
19	64.13	19	119.78	19	109.74
20	64.02	20	117.53	20	107.72
21	63.92	21	115.26	21	105.70
22	63.81	22	113.00	22	103.69
23	63.69	23	110.73	23	101.63
24	63.56	24	108.42	24	99.54
26	63.44	26	106.10	26	97.41
27	63.31	27	103.84	27	95.47
28	63.16	28	101.57	28	93.45
29	63.01	29	99.34	29	91.48
30	62.85	30	97.18	30	89.59
31	62.68	31	95.13	31	87.79
33	62.51	33	93.13	33	86.02
34	62.33	34	91.16	34	84.29
35	62.14	35	89.25	35	82.61
36	61.95	36	87.41	36	81.00
37	61.75	37	85.65	37	79.46
38	61.54	38	83.97	38	78.00
39	61.32	39	82.37	39	76.62
41	61.10	41	80.89	41	75.33
42	60.87	42	79.45	42	74.08
43	60.63	43	78.07	43	72.88
44	60.40	44	76.75	44	71.74
45	60.16	45	75.52	45	70.67
46	59.91	46	74.35	46	69.67
48	59.64	48	73.25	48	68.72
49	59.36	49	72.22	49	67.83
50	59.07	50	71.25	50	67.00
51	58.77	51	70.36	51	66.23
52	58.45	52	69.53	52	65.50
53	58.13	53	68.76	53	64.84
55	57.79	55	68.03	55	64.21
56	57.45	56	67.34	56	63.61
57	57.09	57	66.67	57	63.04
58	56.72	58	66.05	58	62.50
59	56.33	59	65.46	59	61.98
60	55.94	60	64.90	60	61.49

Data Kecepatan Sudut 120°

tube row 1		tube row 2		tube row 3	
degree, 0	V (m/s)	degree, 0	V (m/s)	degree, 0	V (m/s)
0	0	0	0	0	0
1	0.10	1	0.78	1	0.71
2	0.16	2	1.28	2	1.16
3	0.23	3	1.77	3	1.60
5	0.29	5	2.26	5	2.03
6	0.36	6	2.72	6	2.45
7	0.42	7	3.17	7	2.85
8	0.48	8	3.60	8	3.23
9	0.55	9	4.01	9	3.60
10	0.61	10	4.39	10	3.93
12	0.67	12	4.74	12	4.23
13	0.74	13	5.04	13	4.50
14	0.80	14	5.32	14	4.74
15	0.86	15	5.56	15	4.95
16	0.92	16	5.76	16	5.12
17	0.98	17	5.94	17	5.27
19	1.04	19	6.07	19	5.39
20	1.10	20	6.18	20	5.48
21	1.15	21	6.25	21	5.54
22	1.21	22	6.30	22	5.57
23	1.27	23	6.32	23	5.59
24	1.32	24	6.31	24	5.57
26	1.38	26	6.27	26	5.54
27	1.43	27	6.22	27	5.49
28	1.48	28	6.14	28	5.42
29	1.53	29	6.04	29	5.34
30	1.58	30	5.93	30	5.24
31	1.63	31	5.82	31	5.14
33	1.68	33	5.69	33	5.04
34	1.72	34	5.56	34	4.92
35	1.77	35	5.42	35	4.80
36	1.81	36	5.27	36	4.68
37	1.85	37	5.13	37	4.56
38	1.90	38	4.98	38	4.44
39	1.93	39	4.84	39	4.32
41	1.97	41	4.70	41	4.20
42	2.01	42	4.57	42	4.09
43	2.04	43	4.43	43	3.98
44	2.07	44	4.30	44	3.88
45	2.11	45	4.18	45	3.78
46	2.14	46	4.06	46	3.68
48	2.16	48	3.95	48	3.59
49	2.19	49	3.84	49	3.50
50	2.21	50	3.73	50	3.42
51	2.23	51	3.64	51	3.34
52	2.25	52	3.55	52	3.27
53	2.27	53	3.47	53	3.21
55	2.28	55	3.39	55	3.15
56	2.29	56	3.31	56	3.09
57	2.30	57	3.24	57	3.04
58	2.31	58	3.17	58	2.98
59	2.31	59	3.11	59	2.93
60	2.32	60	3.05	60	2.89



62	55,54	62	64,37	62	61,01
63	55,11	63	63,86	63	60,55
64	54,68	64	63,37	64	60,10
65	54,22	65	62,90	65	59,66
66	53,75	66	62,44	66	59,23
67	53,27	67	61,98	67	58,80
69	52,76	69	61,53	69	58,38
70	52,24	70	61,08	70	57,95
71	51,70	71	60,62	71	57,52
72	51,15	72	60,17	72	57,09
73	50,58	73	59,71	73	56,65
74	49,99	74	59,25	74	56,20
75	49,39	75	58,79	75	55,75
77	48,78	77	58,32	77	55,29
78	48,15	78	57,85	78	54,83
79	47,51	79	57,38	79	54,36
80	46,86	80	56,91	80	53,89
81	46,21	81	56,43	81	53,42
82	45,55	82	55,97	82	52,96
84	44,89	84	55,51	84	52,50
85	44,24	85	55,06	85	52,05
86	43,61	86	54,63	86	51,62
87	43,01	87	54,23	87	51,21
88	42,42	88	53,87	88	50,84
89	41,88	89	53,56	89	50,50
91	41,38	91	53,30	91	50,22
92	40,95	92	53,11	92	50,00
93	40,60	93	53,01	93	49,87
94	40,35	94	53,01	94	49,82
95	40,22	95	53,13	95	49,90
96	40,23	96	53,40	96	50,11
98	40,40	98	53,84	98	50,48
99	40,77	99	54,49	99	51,04
100	41,36	100	55,37	100	51,82
101	42,21	101	56,51	101	52,82
102	43,35	102	57,90	102	54,08
103	44,80	103	59,59	103	55,60
105	46,59	105	61,58	105	57,41
106	48,72	106	63,86	106	59,49
107	51,20	107	66,42	107	61,83
108	53,98	108	69,20	108	64,39
109	57,02	109	72,13	109	67,10
110	60,21	110	75,10	110	69,86
111	63,40	111	77,98	111	72,54
113	66,39	113	80,53	113	74,91
114	69,10	114	82,70	114	76,97
115	71,15	115	84,14	115	78,35
116	72,45	116	84,77	116	78,97
117	72,97	117	84,64	117	78,86
118	72,71	118	83,77	118	78,06
120	71,70	120	82,20	120	76,59
121	70,26	121	80,34	121	74,84
122	68,61	122	78,33	122	72,99
123	66,87	123	76,30	123	71,13
124	65,17	124	74,37	124	69,35
125	63,55	125	72,57	125	67,69
127	62,01	127	70,87	127	66,11
128	60,49	128	69,21	128	64,58
129	58,94	129	67,56	129	63,07
130	57,33	130	65,89	130	61,54
131	55,70	131	64,23	131	60,01
132	54,05	132	62,60	132	58,50
134	52,41	134	61,00	134	57,01
135	50,76	135	59,40	135	55,54
136	49,12	136	57,84	136	54,09
137	47,47	137	56,29	137	52,67
138	45,79	138	54,74	138	51,28
139	44,07	139	53,15	139	49,85
141	42,30	141	51,52	141	48,39
142	40,49	142	49,87	142	46,90
143	38,65	143	48,17	143	45,39
144	36,76	144	46,42	144	43,82
145	34,83	145	44,63	145	42,21

62	2,32	62	2,99	62	2,84
63	2,31	63	2,93	63	2,80
64	2,31	64	2,88	64	2,76
65	2,30	65	2,82	65	2,72
66	2,28	66	2,77	66	2,68
67	2,27	67	2,72	67	2,63
69	2,25	69	2,67	69	2,59
70	2,23	70	2,62	70	2,55
71	2,20	71	2,57	71	2,51
72	2,17	72	2,51	72	2,47
73	2,14	73	2,46	73	2,42
74	2,10	74	2,40	74	2,38
75	2,07	75	2,35	75	2,33
77	2,03	77	2,29	77	2,28
78	1,98	78	2,23	78	2,23
79	1,94	79	2,17	79	2,18
80	1,89	80	2,11	80	2,12
81	1,84	81	2,05	81	2,07
82	1,79	82	1,99	82	2,01
84	1,74	84	1,93	84	1,96
85	1,68	85	1,87	85	1,90
86	1,63	86	1,81	86	1,85
87	1,58	87	1,75	87	1,80
88	1,53	88	1,70	88	1,75
89	1,49	89	1,65	89	1,70
91	1,45	91	1,60	91	1,66
92	1,41	92	1,56	92	1,63
93	1,39	93	1,53	93	1,60
94	1,37	94	1,51	94	1,58
95	1,36	95	1,50	95	1,58
96	1,36	96	1,51	96	1,59
98	1,38	98	1,53	98	1,61
99	1,41	99	1,58	99	1,66
100	1,47	100	1,64	100	1,73
101	1,56	101	1,74	101	1,82
102	1,67	102	1,87	102	1,96
103	1,82	103	2,05	103	2,12
105	2,02	105	2,26	105	2,33
106	2,26	106	2,53	106	2,59
107	2,56	107	2,85	107	2,90
108	2,92	108	3,23	108	3,27
109	3,33	109	3,66	109	3,68
110	3,80	110	4,13	110	4,14
111	4,30	111	4,65	111	4,63
113	4,83	113	5,17	113	5,13
114	5,34	114	5,67	114	5,61
115	5,82	115	6,13	115	6,05
116	6,21	116	6,51	116	6,42
117	6,51	117	6,79	117	6,68
118	6,68	118	6,96	118	6,83
120	6,73	120	7,01	120	6,87
121	6,67	121	6,96	121	6,80
122	6,52	122	6,83	122	6,66
123	6,32	123	6,64	123	6,47
124	6,08	124	6,41	124	6,24
125	5,83	125	6,17	125	6,00
127	5,56	127	5,92	127	5,74
128	5,30	128	5,65	128	5,49
129	5,02	129	5,38	129	5,22
130	4,74	130	5,10	130	4,95
131	4,45	131	4,81	131	4,67
132	4,15	132	4,51	132	4,38
134	3,85	134	4,22	134	4,09
135	3,55	135	3,92	135	3,81
136	3,26	136	3,62	136	3,53
137	2,96	137	3,33	137	3,24
138	2,67	138	3,03	138	2,97
139	2,38	139	2,74	139	2,69
141	2,09	141	2,44	141	2,41
142	1,80	142	2,13	142	2,13
143	1,51	143	1,83	143	1,84
144	1,23	144	1,52	144	1,56
145	0,95	145	1,21	145	1,27



146	32,88	146	42,81	146	40,57
147	30,95	147	41,01	147	38,91
149	29,09	149	39,24	149	37,27
150	27,35	150	37,54	150	35,67
151	25,84	151	36,01	151	34,17
152	24,64	152	34,72	152	32,85
153	24,13	153	33,72	153	31,77
154	24,95	154	33,51	154	31,04
156	27,22	156	33,96	156	30,98
157	30,38	157	35,36	157	31,63
158	34,33	158	36,95	158	32,72
159	38,46	159	39,23	159	34,29
160	42,46	160	41,88	160	36,43
161	46,09	161	44,62	161	38,80
163	49,30	163	47,31	163	41,24
164	52,04	164	49,87	164	43,61
165	54,30	165	52,20	165	45,90
166	56,35	166	54,39	166	48,04
167	58,26	167	56,58	167	50,16
168	60,14	168	58,76	168	52,26
170	62,14	170	61,05	170	54,40
171	64,31	171	63,53	171	56,68
172	66,72	172	66,25	172	59,08
173	69,40	173	69,17	173	61,77
174	71,97	174	71,91	174	64,55
175	74,30	175	74,41	175	66,74
177	76,44	177	76,65	177	68,91
178	78,23	178	78,49	178	70,79
179	79,50	179	79,81	179	72,14
180	80,34	180	80,70	180	73,11

146	0,69	146	0,90	146	0,98
147	0,44	147	0,61	147	0,70
149	0,21	149	0,32	149	0,43
150	-0,05	150	-0,07	150	0,18
151	-0,22	151	-0,22	151	-0,09
152	-0,41	152	-0,45	152	-0,30
153	-0,59	153	-0,66	153	-0,51
154	-0,77	154	-0,86	154	-0,70
156	-0,96	156	-1,05	156	-0,87
157	-1,13	157	-1,21	157	-1,03
158	-1,31	158	-1,34	158	-1,16
159	-1,46	159	-1,46	159	-1,27
160	-1,59	160	-1,55	160	-1,37
161	-1,69	161	-1,63	161	-1,44
163	-1,75	163	-1,68	163	-1,50
164	-1,76	164	-1,71	164	-1,54
165	-1,74	165	-1,72	165	-1,56
166	-1,71	166	-1,71	166	-1,56
167	-1,66	167	-1,68	167	-1,55
168	-1,60	168	-1,65	168	-1,52
170	-1,54	170	-1,61	170	-1,49
171	-1,48	171	-1,57	171	-1,45
172	-1,40	172	-1,51	172	-1,40
173	-1,31	173	-1,42	173	-1,33
174	-1,19	174	-1,30	174	-1,22
175	-1,04	175	-1,14	175	-1,09
177	-0,86	177	-0,94	177	-0,91
178	-0,64	178	-0,71	178	-0,71
179	-0,41	179	-0,45	179	-0,47
180	-0,13	180	-0,14	180	-0,19

Data Nilai Nu Sudut 135°

tube row 1		tube row 2		tube row 3	
Degree, θ	Nu	Degree, θ	Nu	Degree, θ	Nu
0	64,97	0	96,59	0	90,47
1	64,97	1	96,59	1	90,12
2	64,97	2	96,53	2	90,09
3	64,96	3	96,48	3	90,05
5	64,93	5	96,41	5	90,00
6	64,90	6	96,31	6	89,85
7	64,86	7	96,08	7	89,64
8	64,83	8	95,78	8	89,44
9	64,79	9	95,46	9	89,22
10	64,74	10	95,13	10	88,99
12	64,67	12	94,78	12	88,72
13	64,59	13	94,38	13	88,43
14	64,52	14	93,96	14	88,11
15	64,44	15	93,50	15	87,76
16	64,35	16	93,01	16	87,38
17	64,26	17	92,47	17	86,96
19	64,17	19	91,91	19	86,52
20	64,07	20	91,33	20	86,04
21	63,96	21	90,69	21	85,49
22	63,85	22	89,98	22	84,89
23	63,73	23	89,24	23	84,26
24	63,61	24	88,46	24	83,60
26	63,48	26	87,66	26	82,92
27	63,35	27	86,84	27	82,20
28	63,21	28	85,99	28	81,46
29	63,05	29	85,12	29	80,68
30	62,89	30	84,23	30	79,88
31	62,73	31	83,32	31	79,07
33	62,56	33	82,40	33	78,23
34	62,38	34	81,48	34	77,40
35	62,19	35	80,55	35	76,55
36	62,00	36	79,61	36	75,68
37	61,80	37	78,65	37	74,80
38	61,59	38	77,68	38	73,89
39	61,38	39	76,70	39	72,99
41	61,16	41	75,73	41	72,09
42	60,93	42	74,77	42	71,20

Data Kecepatan Sudut 135°

tube row 1		tube row 2		tube row 3	
Degree, θ	V (m/s)	Degree, θ	V (m/s)	Degree, θ	V(m/s)
0	0	0	0	0	0
1	0,10	1	0,10	1	0,27
2	0,16	2	0,29	2	0,45
3	0,23	3	0,48	3	0,62
5	0,29	5	0,67	5	0,80
6	0,36	6	0,86	6	0,97
7	0,42	7	1,04	7	1,14
8	0,49	8	1,22	8	1,31
9	0,55	9	1,40	9	1,47
10	0,61	10	1,58	10	1,64
12	0,68	12	1,74	12	1,80
13	0,74	13	1,91	13	1,95
14	0,80	14	2,07	14	2,10
15	0,86	15	2,22	15	2,25
16	0,92	16	2,37	16	2,39
17	0,98	17	2,51	17	2,52
19	1,04	19	2,64	19	2,65
20	1,10	20	2,77	20	2,77
21	1,16	21	2,89	21	2,89
22	1,21	22	3,00	22	2,99
23	1,27	23	3,10	23	3,09
24	1,33	24	3,19	24	3,18
26	1,38	26	3,28	26	3,27
27	1,43	27	3,35	27	3,34
28	1,49	28	3,42	28	3,40
29	1,54	29	3,48	29	3,46
30	1,59	30	3,53	30	3,51
31	1,64	31	3,57	31	3,55
33	1,68	33	3,60	33	3,58
34	1,73	34	3,63	34	3,61
35	1,77	35	3,65	35	3,62
36	1,82	36	3,66	36	3,63
37	1,86	37	3,67	37	3,64
38	1,90	38	3,67	38	3,63
39	1,94	39	3,66	39	3,62
41	1,98	41	3,64	41	3,60
42	2,01	42	3,62	42	3,58





43	60,69	43	73,82	43	70,32
44	60,46	44	72,86	44	69,43
45	60,22	45	71,90	45	68,54
46	59,98	46	70,95	46	67,66
48	59,71	48	70,01	48	66,79
49	59,43	49	69,09	49	65,94
50	59,15	50	68,18	50	65,09
51	58,85	51	67,27	51	64,26
52	58,54	52	66,39	52	63,44
53	58,22	53	65,51	53	62,63
55	57,89	55	64,65	55	61,84
56	57,55	56	63,81	56	61,06
57	57,19	57	62,99	57	60,31
58	56,83	58	62,19	58	59,57
59	56,45	59	61,39	59	58,84
60	56,06	60	60,60	60	58,11
62	55,66	62	59,83	62	57,39
63	55,24	63	59,06	63	56,68
64	54,81	64	58,29	64	55,98
65	54,36	65	57,54	65	55,29
66	53,89	66	56,80	66	54,60
67	53,40	67	56,06	67	53,93
69	52,89	69	55,33	69	53,25
70	52,36	70	54,61	70	52,58
71	51,81	71	53,88	71	51,90
72	51,24	72	53,14	72	51,22
73	50,65	73	52,41	73	50,54
74	50,03	74	51,66	74	49,84
75	49,39	75	50,90	75	49,14
77	48,73	77	50,14	77	48,43
78	48,04	78	49,38	78	47,71
79	47,31	79	48,60	79	46,98
80	46,56	80	47,80	80	46,23
81	45,77	81	47,00	81	45,46
82	44,95	82	46,17	82	44,68
84	44,10	84	45,31	84	43,87
85	43,22	85	44,44	85	43,04
86	42,30	86	43,55	86	42,19
87	41,35	87	42,64	87	41,32
88	40,35	88	41,72	88	40,43
89	39,32	89	40,77	89	39,52
91	38,26	91	39,81	91	38,59
92	37,17	92	38,83	92	37,64
93	36,04	93	37,84	93	36,69
94	34,89	94	36,84	94	35,73
95	33,71	95	35,85	95	34,77
96	32,52	96	34,86	96	33,82
98	31,31	98	33,90	98	32,89
99	30,10	99	32,95	99	31,98
100	28,89	100	32,04	100	31,11
101	27,69	101	31,18	101	30,29
102	26,53	102	30,39	102	29,54
103	25,40	103	29,67	103	28,86
105	24,31	105	29,06	105	28,27
106	23,30	106	28,53	106	27,77
107	22,36	107	28,16	107	27,43
108	21,52	108	27,97	108	27,25
109	20,78	109	27,96	109	27,25
110	20,18	110	28,08	110	27,37
111	19,78	111	28,36	111	27,68
113	19,61	113	28,88	113	28,21
114	19,67	114	29,62	114	28,96
115	20,00	115	30,57	115	29,93
116	20,69	116	31,75	116	31,15
117	21,75	117	33,16	117	32,63
118	23,19	118	34,83	118	34,38
120	25,06	120	36,82	120	36,51
121	27,35	121	39,16	121	38,91
122	30,10	122	41,79	122	41,62
123	33,27	123	44,74	123	44,55
124	36,79	124	47,90	124	47,66
125	40,48	125	51,25	125	50,87
127	44,76	127	54,70	127	54,73

43	2,05	43	3,60	43	3,56
44	2,08	44	3,57	44	3,53
45	2,11	45	3,54	45	3,49
46	2,14	46	3,50	46	3,45
48	2,17	48	3,46	48	3,41
49	2,20	49	3,41	49	3,36
50	2,22	50	3,37	50	3,32
51	2,24	51	3,32	51	3,27
52	2,26	52	3,27	52	3,21
53	2,28	53	3,21	53	3,16
55	2,29	55	3,16	55	3,11
56	2,30	56	3,10	56	3,05
57	2,31	57	3,05	57	2,99
58	2,32	58	2,99	58	2,94
59	2,33	59	2,93	59	2,88
60	2,33	60	2,87	60	2,82
62	2,33	62	2,81	62	2,76
63	2,33	63	2,75	63	2,70
64	2,32	64	2,69	64	2,64
65	2,31	65	2,63	65	2,58
66	2,30	66	2,56	66	2,52
67	2,28	67	2,50	67	2,45
69	2,26	69	2,43	69	2,39
70	2,24	70	2,37	70	2,33
71	2,21	71	2,30	71	2,26
72	2,18	72	2,23	72	2,19
73	2,15	73	2,16	73	2,12
74	2,11	74	2,09	74	2,05
75	2,07	75	2,02	75	1,98
77	2,02	77	1,94	77	1,91
78	1,97	78	1,87	78	1,83
79	1,92	79	1,79	79	1,75
80	1,86	80	1,70	80	1,67
81	1,79	81	1,62	81	1,59
82	1,73	82	1,54	82	1,50
84	1,66	84	1,45	84	1,41
85	1,58	85	1,36	85	1,32
86	1,50	86	1,26	86	1,23
87	1,42	87	1,17	87	1,14
88	1,33	88	1,07	88	1,04
89	1,24	89	0,98	89	0,95
91	1,15	91	0,88	91	0,85
92	1,06	92	0,78	92	0,75
93	0,97	93	0,69	93	0,65
94	0,87	94	0,59	94	0,56
95	0,78	95	0,49	95	0,46
96	0,68	96	0,40	96	0,37
98	0,59	98	0,31	98	0,28
99	0,50	99	0,22	99	0,20
100	0,42	100	0,14	100	0,12
101	0,33	101	0,06	101	0,04
102	0,26	102	0,02	102	-0,04
103	0,19	103	-0,09	103	-0,11
105	0,12	105	-0,16	105	-0,17
106	0,06	106	-0,22	106	-0,23
107	-0,02	107	-0,28	107	-0,29
108	-0,04	108	-0,33	108	-0,34
109	-0,09	109	-0,39	109	-0,39
110	-0,13	110	-0,43	110	-0,43
111	-0,17	111	-0,48	111	-0,47
113	-0,20	113	-0,52	113	-0,51
114	-0,24	114	-0,56	114	-0,54
115	-0,27	115	-0,59	115	-0,57
116	-0,31	116	-0,62	116	-0,60
117	-0,34	117	-0,65	117	-0,62
118	-0,37	118	-0,67	118	-0,64
120	-0,40	120	-0,69	120	-0,65
121	-0,42	121	-0,70	121	-0,64
122	-0,43	122	-0,69	122	-0,62
123	-0,43	123	-0,67	123	-0,58
124	-0,40	124	-0,63	124	-0,51
125	-0,33	125	-0,55	125	-0,41
127	-0,21	127	-0,44	127	-0,27



128	48,72	128	58,89	128	58,10
129	52,69	129	62,51	129	61,51
130	56,56	130	66,21	130	64,90
131	60,02	131	69,93	131	67,93
132	62,97	132	73,20	132	70,52
134	65,32	134	76,00	134	72,56
135	67,05	135	78,20	135	74,06
136	67,90	136	79,83	136	74,71
137	67,92	137	80,51	137	74,55
138	67,19	138	80,31	138	73,68
139	65,82	139	79,33	139	72,17
141	63,91	141	77,64	141	70,10
142	61,78	142	75,35	142	67,82
143	59,50	143	72,82	143	65,42
144	57,17	144	70,16	144	62,98
145	54,82	145	67,46	145	60,53
146	52,46	146	64,77	146	58,12
147	50,05	147	62,08	147	55,66
149	47,55	149	59,34	149	53,14
150	44,90	150	56,51	150	50,47
151	42,13	151	53,52	151	47,66
152	39,23	152	50,36	152	44,74
153	36,22	153	47,08	153	41,69
154	33,12	154	43,67	154	38,53
156	30,01	156	40,16	156	35,31
157	26,93	157	36,59	157	32,07
158	23,96	158	33,04	158	28,90
159	21,15	159	29,60	159	25,85
160	18,52	160	26,32	160	22,97
161	16,39	161	23,24	161	20,31
163	15,03	163	20,57	163	18,28
164	15,40	164	18,73	164	17,05
165	17,53	165	18,22	165	17,47
166	20,62	166	19,73	166	19,37
167	24,12	167	22,57	167	22,13
168	28,10	168	26,02	168	25,42
170	32,77	170	29,92	170	29,27
171	37,99	171	34,40	171	33,23
172	43,32	172	39,43	172	38,56
173	48,26	173	44,64	173	43,32
174	52,55	174	49,55	174	47,46
175	56,24	175	53,90	175	51,20
177	58,93	177	57,54	177	53,85
178	60,93	178	60,25	178	55,83
179	62,23	179	62,30	179	57,09
180	62,96	180	63,65	180	57,88

128	0,07	128	-0,28	128	-0,09
129	0,18	129	-0,09	129	0,16
130	0,43	130	0,19	130	0,43
131	0,73	131	0,47	131	0,73
132	1,08	132	0,80	132	1,08
134	1,42	134	1,18	134	1,43
135	1,76	135	1,55	135	1,77
136	2,07	136	1,93	136	2,09
137	2,32	137	2,27	137	2,36
138	2,50	138	2,57	138	2,56
139	2,61	139	2,79	139	2,70
141	2,64	141	2,94	141	2,76
142	2,61	142	3,00	142	2,76
143	2,53	143	3,00	143	2,71
144	2,41	144	2,94	144	2,61
145	2,27	145	2,84	145	2,49
146	2,11	146	2,70	146	2,35
147	1,93	147	2,54	147	2,18
149	1,73	149	2,35	149	2,00
150	1,52	150	2,15	150	1,79
151	1,30	151	1,91	151	1,58
152	1,06	152	1,67	152	1,34
153	0,83	153	1,40	153	1,10
154	0,61	154	1,12	154	0,85
156	0,40	156	0,85	156	0,62
157	0,22	157	0,60	157	0,40
158	0,08	158	0,36	158	0,21
159	-0,05	159	0,17	159	0,06
160	-0,13	160	-0,03	160	-0,08
161	-0,20	161	-0,13	161	-0,17
163	-0,24	163	-0,22	163	-0,25
164	-0,27	164	-0,29	164	-0,30
165	-0,30	165	-0,35	165	-0,34
166	-0,33	166	-0,39	166	-0,38
167	-0,37	167	-0,43	167	-0,41
168	-0,44	168	-0,48	168	-0,46
170	-0,53	170	-0,54	170	-0,53
171	-0,64	171	-0,63	171	-0,62
172	-0,74	172	-0,74	172	-0,71
173	-0,78	173	-0,82	173	-0,76
174	-0,78	174	-0,87	174	-0,76
175	-0,72	175	-0,85	175	-0,71
177	-0,60	177	-0,78	177	-0,60
178	-0,46	178	-0,66	178	-0,47
179	-0,29	179	-0,50	179	-0,30
180	-0,10	180	-0,32	180	-0,09

## Data Nilai Nu Sudut 150° Data Kecepatan Sudut 150°

tube row 1		tube row 2		tube row 3	
Degree, 0	Nu	Degree, 0	Nu	Degree, 0	Nu
0	64,99	0	84,93	0	75,86
1	64,99	1	84,93	1	75,85
2	64,99	2	84,90	2	75,85
3	64,98	3	84,88	3	75,85
5	64,95	5	84,85	5	75,81
6	64,92	6	84,75	6	75,75
7	64,89	7	84,60	7	75,70
8	64,85	8	84,43	8	75,64
9	64,82	9	84,26	9	75,57
10	64,76	10	84,07	10	75,50
12	64,69	12	83,86	12	75,42
13	64,61	13	83,63	13	75,32
14	64,54	14	83,39	14	75,22
15	64,46	15	83,11	15	75,09
16	64,37	16	82,83	16	74,93
17	64,28	17	82,51	17	74,74
19	64,18	19	82,14	19	74,53
20	64,08	20	81,74	20	74,31
21	63,98	21	81,32	21	74,07
22	63,86	22	80,88	22	73,82
23	63,74	23	80,43	23	73,54

tube row 1		tube row 2		tube row 3	
Degree, 0	V (m/s)	Degree, 0	V (m/s)	Degree, 0	V (m/s)
0	0	0	0	0	0
1	0,10	1	0,07	1	0,17
2	0,16	2	0,21	2	0,28
3	0,23	3	0,34	3	0,39
5	0,29	5	0,47	5	0,51
6	0,36	6	0,60	6	0,62
7	0,42	7	0,74	7	0,73
8	0,49	8	0,86	8	0,84
9	0,55	9	0,99	9	0,95
10	0,61	10	1,12	10	1,06
12	0,68	12	1,24	12	1,16
13	0,74	13	1,36	13	1,27
14	0,80	14	1,48	14	1,37
15	0,86	15	1,60	15	1,48
16	0,92	16	1,71	16	1,58
17	0,98	17	1,82	17	1,68
19	1,04	19	1,92	19	1,77
20	1,10	20	2,03	20	1,87
21	1,16	21	2,12	21	1,96
22	1,22	22	2,21	22	2,05
23	1,27	23	2,30	23	2,13



24	63.62	24	79.96	24	73.24
26	63.49	26	79.46	26	72.92
27	63.36	27	78.95	27	72.58
28	63.22	28	78.42	28	72.21
29	63.06	29	77.86	29	71.82
30	62.90	30	77.29	30	71.40
31	62.73	31	76.71	31	70.96
33	62.56	33	76.11	33	70.51
34	62.38	34	75.50	34	70.05
35	62.19	35	74.88	35	69.55
36	62.00	36	74.22	36	69.02
37	61.80	37	73.55	37	68.47
38	61.59	38	72.87	38	67.91
39	61.37	39	72.16	39	67.31
41	61.15	41	71.44	41	66.71
42	60.91	42	70.74	42	66.10
43	60.68	43	70.02	43	65.49
44	60.44	44	69.30	44	64.85
45	60.20	45	68.55	45	64.19
46	59.94	46	67.79	46	63.52
48	59.68	48	67.03	48	62.84
49	59.39	49	66.27	49	62.15
50	59.10	50	65.51	50	61.46
51	58.80	51	64.74	51	60.76
52	58.48	52	63.97	52	60.06
53	58.15	53	63.21	53	59.36
55	57.81	55	62.44	55	58.65
56	57.46	56	61.68	56	57.94
57	57.10	57	60.92	57	57.24
58	56.72	58	60.17	58	56.53
59	56.33	59	59.42	59	55.82
60	55.93	60	58.66	60	55.10
62	55.52	62	57.90	62	54.37
63	55.08	63	57.13	63	53.64
64	54.63	64	56.37	64	52.90
65	54.16	65	55.60	65	52.16
66	53.67	66	54.82	66	51.41
67	53.15	67	54.04	67	50.65
69	52.62	69	53.26	69	49.88
70	52.06	70	52.48	70	49.10
71	51.47	71	51.69	71	48.30
72	50.86	72	50.87	72	47.48
73	50.22	73	50.04	73	46.65
74	49.55	74	49.20	74	45.78
75	48.86	75	48.33	75	44.89
77	48.13	77	47.45	77	43.98
78	47.36	78	46.54	78	43.03
79	46.56	79	45.60	79	42.06
80	45.71	80	44.65	80	41.05
81	44.82	81	43.66	81	40.00
82	43.89	82	42.63	82	38.91
84	42.91	84	41.57	84	37.78
85	41.87	85	40.48	85	36.61
86	40.78	86	39.35	86	35.42
87	39.64	87	38.19	87	34.18
88	38.45	88	37.00	88	32.92
89	37.21	89	35.77	89	31.64
91	35.91	91	34.53	91	30.34
92	34.55	92	33.26	92	29.04
93	33.15	93	31.99	93	27.75
94	31.72	94	30.71	94	26.48
95	30.24	95	29.45	95	25.25
96	28.74	96	28.21	96	24.09
98	27.23	98	27.01	98	22.98
99	25.72	99	25.87	99	21.97
100	24.22	100	24.80	100	21.21
101	22.76	101	23.80	101	20.57
102	21.34	102	23.01	102	20.18
103	19.99	103	22.40	103	20.19
105	18.71	105	21.94	105	20.62
106	17.59	106	21.82	106	21.47
107	16.66	107	22.06	107	22.56
108	15.96	108	22.68	108	23.80

24	1.33	24	2.39	24	2.21
26	1.38	26	2.46	26	2.29
27	1.43	27	2.54	27	2.36
28	1.49	28	2.61	28	2.43
29	1.54	29	2.67	29	2.50
30	1.59	30	2.73	30	2.56
31	1.64	31	2.78	31	2.61
33	1.68	33	2.83	33	2.67
34	1.73	34	2.87	34	2.71
35	1.77	35	2.91	35	2.76
36	1.82	36	2.95	36	2.79
37	1.86	37	2.97	37	2.82
38	1.90	38	3.00	38	2.85
39	1.94	39	3.01	39	2.87
41	1.98	41	3.02	41	2.88
42	2.01	42	3.03	42	2.90
43	2.05	43	3.04	43	2.90
44	2.08	44	3.03	44	2.90
45	2.11	45	3.03	45	2.90
46	2.14	46	3.02	46	2.89
48	2.17	48	3.00	48	2.88
49	2.19	49	2.98	49	2.86
50	2.22	50	2.96	50	2.84
51	2.24	51	2.94	51	2.82
52	2.26	52	2.91	52	2.79
53	2.27	53	2.87	53	2.76
55	2.29	55	2.84	55	2.73
56	2.30	56	2.80	56	2.69
57	2.31	57	2.76	57	2.65
58	2.31	58	2.72	58	2.61
59	2.32	59	2.67	59	2.56
60	2.32	60	2.63	60	2.52
62	2.31	62	2.58	62	2.47
63	2.31	63	2.53	63	2.41
64	2.30	64	2.47	64	2.36
65	2.29	65	2.42	65	2.30
66	2.27	66	2.36	66	2.24
67	2.26	67	2.30	67	2.18
69	2.23	69	2.24	69	2.11
70	2.21	70	2.17	70	2.04
71	2.17	71	2.10	71	1.97
72	2.14	72	2.04	72	1.90
73	2.10	73	1.96	73	1.82
74	2.06	74	1.89	74	1.74
75	2.01	75	1.81	75	1.66
77	1.96	77	1.73	77	1.57
78	1.90	78	1.65	78	1.48
79	1.84	79	1.56	79	1.38
80	1.77	80	1.47	80	1.29
81	1.69	81	1.38	81	1.19
82	1.62	82	1.28	82	1.09
84	1.53	84	1.19	84	0.98
85	1.45	85	1.09	85	0.88
86	1.35	86	0.98	86	0.77
87	1.25	87	0.88	87	0.66
88	1.15	88	0.78	88	0.56
89	1.05	89	0.67	89	0.45
91	0.94	91	0.57	91	0.35
92	0.83	92	0.47	92	0.25
93	0.72	93	0.37	93	0.16
94	0.62	94	0.27	94	0.08
95	0.51	95	0.18	95	0.02
96	0.41	96	0.10	96	-0.08
98	0.31	98	0.03	98	-0.15
99	0.22	99	-0.06	99	-0.21
100	0.14	100	-0.13	100	-0.27
101	0.06	101	-0.19	101	-0.32
102	-0.02	102	-0.25	102	-0.36
103	-0.07	103	-0.31	103	-0.41
105	-0.12	105	-0.36	105	-0.45
106	-0.17	106	-0.41	106	-0.50
107	-0.21	107	-0.45	107	-0.53
108	-0.25	108	-0.50	108	-0.57





109	15,76	109	23,63	109	25,16
110	16,22	110	24,77	110	26,55
111	17,26	111	26,00	111	27,95
113	18,70	113	27,30	113	29,34
114	20,42	114	28,64	114	30,65
115	22,28	115	29,97	115	31,82
116	24,17	116	31,28	116	32,87
117	26,03	117	32,54	117	33,76
118	27,82	118	33,67	118	34,43
120	29,48	120	34,68	120	34,82
121	31,02	121	35,61	121	35,01
122	32,45	122	36,48	122	35,09
123	33,83	123	37,32	123	35,21
124	35,21	124	38,14	124	35,52
125	36,65	125	39,06	125	36,08
127	38,23	127	40,14	127	36,97
128	39,98	128	41,41	128	38,25
129	41,94	129	42,94	129	39,94
130	44,12	130	44,72	130	42,05
131	46,52	131	46,78	131	44,57
132	49,17	132	49,18	132	47,47
134	52,03	134	51,91	134	50,73
135	55,12	135	54,90	135	54,43
136	58,60	136	58,13	136	58,60
137	62,47	137	61,77	137	63,14
138	66,60	138	65,81	138	68,01
139	71,04	139	70,11	139	73,30
141	75,29	141	74,67	141	78,78
142	79,56	142	79,09	142	84,07
143	83,80	143	83,51	143	88,64
144	87,86	144	87,87	144	93,06
145	90,27	145	92,13	145	93,10
146	91,91	146	94,62	146	90,25
147	92,22	147	96,07	147	84,81
149	90,87	149	95,93	149	77,12
150	87,79	150	93,77	150	68,93
151	83,66	151	89,78	151	61,00
152	78,61	152	84,75	152	53,85
153	73,40	153	78,92	153	47,59
154	68,21	154	73,17	154	42,19
156	63,21	156	67,56	156	37,44
157	58,45	157	62,37	157	33,23
158	53,83	158	57,49	158	29,45
159	49,29	159	52,77	159	25,99
160	44,86	160	48,23	160	22,81
161	40,55	161	43,90	161	19,92
163	36,33	163	39,67	163	17,31
164	32,24	164	35,56	164	15,00
165	28,35	165	31,59	165	13,00
166	24,71	166	27,82	166	11,34
167	21,36	167	24,29	167	10,04
168	18,38	168	21,04	168	9,12
170	15,96	170	18,14	170	8,62
171	14,29	171	15,76	171	8,52
172	13,86	172	14,02	172	8,73
173	14,92	173	13,38	173	9,16
174	17,51	174	14,09	174	9,67
175	21,39	175	16,23	175	10,16
177	26,00	177	19,58	177	10,55
178	30,25	178	23,66	178	10,83
179	33,53	179	27,46	179	10,99
180	35,29	180	30,46	180	11,08

109	-0,28	109	-0,54	109	-0,61
110	-0,32	110	-0,58	110	-0,63
111	-0,36	111	-0,62	111	-0,66
113	-0,39	113	-0,65	113	-0,68
114	-0,43	114	-0,68	114	-0,70
115	-0,47	115	-0,70	115	-0,72
116	-0,51	116	-0,73	116	-0,72
117	-0,54	117	-0,74	117	-0,72
118	-0,57	118	-0,75	118	-0,71
120	-0,60	120	-0,75	120	-0,68
121	-0,61	121	-0,75	121	-0,65
122	-0,63	122	-0,75	122	-0,62
123	-0,64	123	-0,74	123	-0,60
124	-0,65	124	-0,73	124	-0,58
125	-0,67	125	-0,73	125	-0,58
127	-0,69	127	-0,73	127	-0,59
128	-0,72	128	-0,75	128	-0,61
129	-0,75	129	-0,77	129	-0,65
130	-0,78	130	-0,79	130	-0,70
131	-0,81	131	-0,82	131	-0,77
132	-0,84	132	-0,86	132	-0,83
134	-0,87	134	-0,90	134	-0,91
135	-0,89	135	-0,93	135	-0,98
136	-0,90	136	-0,96	136	-1,04
137	-0,89	137	-0,98	137	-1,09
138	-0,86	138	-0,97	138	-1,10
139	-0,78	139	-0,94	139	-1,07
141	-0,66	141	-0,86	141	-0,96
142	-0,49	142	-0,74	142	-0,79
143	-0,27	143	-0,55	143	-0,52
144	0,09	144	-0,32	144	-0,17
145	0,35	145	0,09	145	0,23
146	0,72	146	0,34	146	0,62
147	1,06	147	0,74	147	0,88
149	1,36	149	1,09	149	1,00
150	1,58	150	1,40	150	1,01
151	1,71	151	1,61	151	0,92
152	1,74	152	1,72	152	0,80
153	1,69	153	1,72	153	0,66
154	1,59	154	1,64	154	0,53
156	1,44	156	1,52	156	0,42
157	1,28	157	1,36	157	0,33
158	1,10	158	1,20	158	0,24
159	0,92	159	1,01	159	0,17
160	0,74	160	0,85	160	0,12
161	0,56	161	0,67	161	0,07
163	0,40	163	0,51	163	0,04
164	0,26	164	0,37	164	0,01
165	0,14	165	0,24	165	0,01
166	0,04	166	0,13	166	0,02
167	0,03	167	0,04	167	0,02
168	-0,08	168	0,03	168	0,03
170	-0,11	170	-0,07	170	-0,03
171	-0,12	171	-0,09	171	-0,03
172	-0,13	172	-0,11	172	-0,03
173	-0,14	173	-0,12	173	-0,03
174	-0,16	174	-0,12	174	-0,03
175	-0,19	175	-0,14	175	-0,02
177	-0,20	177	-0,16	177	-0,02
178	-0,19	178	-0,17	178	-0,01
179	-0,14	179	-0,16	179	-0,01
180	-0,05	180	-0,12	180	0,00